



LAPORAN TUGAS AKHIR - TL141584

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK ARUS
PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN
COATING DAN TANPA COATING DI DALAM TANAH**

AZMI MAHIRI
NRP. 2712 100 109

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.
Tubagus Noor R. ST., M.Sc.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



FINAL PROJECT - TL141584

**IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION
SYSTEM DESIGN FOR PIPE STEEL API 5L GRADE B
WITH COATING AND NON-COATING ON
UNDERGROUND**

AZMI MAHIRI
NRP. 2712 100 109

ADVISOR
Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.
Tubagus Noor R. ST., M.Sc.

**MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI ARUS PAKSA
PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN
COATING DAN TANPA COATING DI DALAM TANAH**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Korosi dan Analisa Kegagalan
Program Studi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**Azmi Mahiri
NRP. 2712 100 109**

Disetujui Oleh:

Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.(Pembimbing)

Tubagus Noor R. ST., M.Sc.(Co-Pembimbing)



PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI ARUS PAKSA PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN COATING DAN TANPA COATING DI DALAM TANAH

Nama : Azmi Mahiri
NRP : 2712 100 109
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
Tubagus Noor R. S.T., M.Sc.

Abstrak

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) adalah sistem perlindungan logam terhadap korosi dengan menggunakan sumber arus DC dari luar sistem. Kutub positif sumber arus DC dihubungkan dengan anode inert (grafit) sedangkan kutub negatif sumber arus DC dihubungkan dengan logam atau katoda yang akan dilindungi dari serangan korosi. ICCP digunakan karena sistem proteksi ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya mudah untuk mengontrol arus proteksi, dapat memproteksi luasan yang cukup besar, mudah mendeteksi kerusakan pada sistem proteksi, dan dapat digunakan di berbagai macam jenis katoda dan lingkungan yang berbeda. Pada perancangan ini dilakukan desain ICCP pada katoda API 5L grade B dengan pemberian coating dan tanpa coating dengan kondisi lingkungan yang terus berubah. Pada pipa tanpa coating, arus yang diperlukan lebih besar dibandingkan dengan pipa coating, perubahan lingkungan membuat kondisi lingkungan berubah menjadi lembab dan kering maupun sebaliknya. Saat kondisi lingkungan basah, nilai resistivitas tanah menurun menyebabkan keperluan arus proteksi meningkat, sementara saat kondisi lingkungan kering, nilai resistivitas tanah meningkat menyebabkan keperluan arus proteksi menurun.

Kata kunci : Korosi, Proteksi Katodik, Arus Paksa, API 5L, Pipa Baja

IMPRESSED CURRENT CATHODIC PROTECTION SYSTEM DESIGN FOR PIPE STEEL API 5L GRADE B WITH COATING AND NON-COATING ON UNDERGROUND

Name : Azmi Mahiri
Student Number: 2712 100 109
Department : Materials and Metallurgical Engineering ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono DEA.
Tubagus Noor R. ST.,M.Sc

Abstract

Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) is a system of metal protection against corrosion by using DC current source from outside the system. The positive pole of DC current source is connected to the inert anode (graphite) while the negative pole of the DC current source connected with metal or cathode to be protected from corrosion. ICCP has several advantages such as easy to control the current protection, had large surface area protection, easy to detect damage the protection system, and can be used in various types of cathodes and a different environment. The ICCP design used for cathode pipe steel API 5L grade B with coating and without coating therefore the environmental conditions continually changing. Pipe without coating indicates need huge current protection more than pipe with coating. The conditions of environmental changes from moist and dry and the reversed ,when conditions are wet, the value of soil resistivity is decrease, its led to the purposes of current protection increases, while conditions is dry, soil resistivity values increase causing the current protection is decreases

Keywords: Corrosion, Cathodic Protection, Impressed Current, API 5L, pipe steel

Daftar Isi

Kata Pengantar	i
Lembar Pengesahan.....	ii
Abstrak	iii
Daftar Isi.....	iv
Daftar Gambar	vi
Daftar Tabel.....	vii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang.....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	2
I.3 Batasan Masalah.....	2
I.4 Tujuan Penelitian.....	2
I.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	4
II.1 Korosi	4
II.2 Mekanisme Korosi.....	5
II.3 Jenis – Jenis Korosi	6
II.3.1 Korosi Merata (Uniform/General Corrosion).....	6
II.3.2 Korosi Galvanis (<i>Galvanic Corrosion</i>).....	7
II.3.3 Korosi Celah (Crevice Corrosion)	8
II.3.4 Korosi Sumuran (<i>Pitting Corrosion</i>)	9
II.3.5 Korosi Erosi (Erosion Corrosion).....	10
II.3.6 Korosi Batas Butir (Intergranular Corrosion)	10
II.4 Proteksi Katodik	11
II.4.1 Proteksi Katodik Anoda Tumbal (Sacrificial Anode Cathodic Protection).....	12
II.4.2 Proteksi Katodik Arus Paksa (Impressed Current Cathodic Protection).....	13
II.5 Anoda	15
II.6 Kelembaban Tanah.....	16
II.7 Resistivitas Tanah.....	16
II.8 Lapisan Pelindung	18

II.9	Potensial Proteksi	19
II.10	Diagram Pourbaix (E/pH).....	19
II.11	Acuan Penelitian	20
II.11.1	Pengaruh Variasi Cacat Goresan Lapis Lindung dan Variasi pH Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B (Trendy,2015).....	20
II.11.2	Pengaruh Variasi Resistivitas Tanah dan Kadar Air Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B dengan Variasi Goresan Lapis Lindung (Arini,2015).....	22
BAB III	.....	25
METODE PENELITIAN	.....	25
III.1	Diagram Alir.....	25
III.2	Bahan.....	27
III.3	Peralatan	28
III.4	Langkah Perancangan.....	28
BAB IV	.....	42
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	42
IV.1	Hasil Perancangan Proteksi	42
IV.1.1	Perancangan ICCP pada Pipa Tanpa Coating.....	42
IV.1.2	Perancangan ICCP pada Pipa Coating.....	44
IV.2	Skema Desain Perancangan.....	46
IV.3	Pengukuran Resistivitas Tanah.....	48
IV.4	Pengukuran pH Tanah	51
IV.5	Pengujian Arus dan Tegangan Proteksi.....	54
IV.6	Evaluasi Visual.....	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	.....	73
V.1	Kesimpulan.....	73
V.2	Saran.....	73
Daftar Pustaka	.....	viii
Lampiran	.....	xii
Biografi Penulis	.....	xxiii

Daftar Gambar

<i>Gambar 2.1 Mekanisme Korosi Merata</i>	<i>7</i>
<i>Gambar 2.2 Mekanisme Korosi Galvanis</i>	<i>8</i>
<i>Gambar 2.3 Mekanisme Korosi Celah</i>	<i>9</i>
<i>Gambar 2.4 Mekanisme Korosi Sumuran</i>	<i>10</i>
<i>Gambar 2.5 Mekanisme Korosi Batas Butir</i>	<i>11</i>
<i>Gambar 2.6 Skema Proteksi Katodik Anoda Tumbal.....</i>	<i>13</i>
<i>Gambar 2.7 Skema Proteksi Katodik Arus Paksa</i>	<i>14</i>
<i>Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Fe</i>	<i>20</i>
<i>Gambar 2.9 Pengaruh pH Pada Kebutuhan Arus Proteksi</i>	<i>22</i>
<i>Gambar 2.10 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Resistivitas Tanah pada Kadar Air Tanah 25%.....</i>	<i>23</i>
<i>Gambar 2.10 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Resistivitas Tanah pada Kadar Air Tanah 0%.....</i>	<i>23</i>
<i>Gambar 3.1 Bahan Penelitian.....</i>	<i>27</i>
<i>Gambar 3.2 Peralatan Penelitian</i>	<i>28</i>
<i>Gambar 3.3 Pengukuran Resistivitas Tanah.....</i>	<i>29</i>
<i>Gambar 3.4 Pengukuran pH tanah</i>	<i>30</i>
<i>Gambar 3.5 Pengukuran pipa baja API 5L.....</i>	<i>35</i>
<i>Gambar 3.6 Pembersihan pipa dari pengotor.....</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 3.7 Pengait kabel pada pipa baja.....</i>	<i>36</i>
<i>Gambar 3.8 Pemberian coating dengan wrapping</i>	<i>37</i>
<i>Gambar 3.9 Pipa yang tidak diberi coating.....</i>	<i>37</i>
<i>Gambar 3.10 Pengukuran anoda grafit</i>	<i>38</i>
<i>Gambar 3.11 Anoda yang telah diberi sambungan kabel</i>	<i>39</i>
<i>Gambar 3.12 Pipa dan grafit ditanam di kedalaman 50cm</i>	<i>40</i>
<i>Gambar 3.13 Pengukuran tegangan proteksi.....</i>	<i>41</i>
<i>Gambar 4.1 Skema Perancangan Sistem Proteksi Katodik Arus Paksa</i>	<i>47</i>
<i>Gambar 4.2 Sample tanah ± 10 gram</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4.3 Sample tanah dicampur dengan air sebanyak ± 10mL</i>	<i>52</i>
<i>Gambar 4.4 Pengukuran pH pada sample tanah.....</i>	<i>53</i>

<i>Gambar 4.5 Pengukuran potensial awal pipa sebelum diberi arus proteksi</i>	<i>55</i>
<i>Gambar 4.6 Pipa tanpa coating setelah 30 hari pemberian arus proteksi</i>	<i>62</i>
<i>Gambar 4.7 Pipa coating setelah 30 hari pemberian arus proteksi</i>	<i>64</i>
<i>Gambar 4.8 Pipa tanpa coating mengalami korosi dibagian sambungan baut kabel.....</i>	<i>64</i>
<i>Gambar 4.9 Pipa tanpa coating terdapat karat pada beberapa titik.....</i>	<i>65</i>
<i>Gambar 4.10 Pengukuran dimensi pipa tanpa coating.....</i>	<i>65</i>
<i>Gambar 4.11 Hasil pipa coating yang telah dibuka lapisan coatingnya</i>	<i>68</i>
<i>Gambar 4.12 Hasil pipa tanpa pemberian arus proteksi dan lapisan coating</i>	<i>70</i>
<i>Gambar 4.13 Anoda grafit pada pipa tanpa coating</i>	<i>71</i>
<i>Gambar 4.14 Anoda grafit pada pipa coating</i>	<i>71</i>

Daftar Tabel

Tabel 2.1 Deret Potensial Standart	12
Tabel 2.2 Jenis dan Spesifikasi Anoda	15
Tabel 2.3 Klasifikasi Resistivitas Tanah	17
Tabel 2.4. Nilai Elektroda Acuan	19
Tabel 3.1. Komposisi Kimia API 5L Grade B	33
Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah	49
Tabel 4.2. Hasil Pengukuran pH.....	53
Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Potensial Pipa Sebelum Proteksi....	55
Tabel 4.4. Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating	56
Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating.....	56
Tabel 4.6. Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa tanpa Coating	58
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating	58

Daftar Grafik

Grafik 4.1 Hasil pengukuran resistivitas tanah.....	49
Grafik 4.2 Hasil pengukuran pH tanah.....	54
Grafik 4.3 Arus proteksi pipa coating dan tanpa coating	57
Grafik 4.4 Tegangan proteksi setelah pemberian arus.....	59

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Korosi atau karat merupakan suatu kondisi degradasi logam yang diakibatkan oleh reaksi reduksi - oksidasi yang terjadi pada logam dengan berbagai zat yang ada di lingkungan sekitarnya sehingga menghasilkan suatu senyawa yang tidak dikehendaki, Contoh korosi yang umum terjadi adalah perkaratan logam besi. Korosi tidak dapat dicegah maupun dihentikan secara total tapi korosi ini hanya bisa diperlambat lajunya sehingga memperlambat pula proses kerusakan yang terjadi pada material tersebut. Melihat keadaan yang tidak menguntungkan seperti ini dimana korosi merupakan proses alam yang tidak dapat dihindari namun hanya dapat diminimalisir atau dicegah maka korosi tentu sangat merugikan karena dapat mengurangi kemampuan suatu material atau logam dalam menerima suatu beban.

Pipa baja banyak digunakan dalam berbagai industri, pipa baja biasa digunakan untuk memindahkan zat hasil pemrosesan seperti cairan, gas, uap, zat padat yang dicairkan maupun serbuk halus. Material yang digunakan sebagai pipa sangat banyak diantaranya adalah beton cor, gelas, timbal, kuningan (brass), tembaga, plastik, aluminium, besi tuang, namun pada umumnya material yang umum digunakan sebagai pipa adalah baja karbon dan baja paduan. Pada pipa baja yang ditanam didalam tanah sangat rawan terjadi korosi akibat pengaruh lingkungan sekitarnya. Proteksi pada pipa baja diperlukan agar menghambat laju korosi sehingga pipa tersebut tidak mengalami kegagalan atau kerusakan yang dapat membahayakan lingkungan sekitar. Proteksi pada pipa saat ini sudah mengalami beberapa kemajuan, proteksi yang biasa digunakan antara lain dengan menggunakan metoda anoda tumbal, metoda arus paksa, inhibitor, dan penggunaan lapisan pelindung (coating). Masing masing metoda memiliki keunggulan dan kekurangan tersendiri. Impressed Current Cathodic Protection adalah perlindungan dengan memberikan elektron pada material



pipa dengan jalan menggunakan sumber arus listrik dari luar sistem. Elektron yang diberikan berasal dari anode permanen yang terbuat dari logam. Sumber arus listrik yang digunakan untuk memberikan elektron ke badan pipa berasal dari rectifier. Kutub positif sumber arus DC dihubungkan dengan anode sedangkan kutub negatif sumber arus DC dihubungkan dengan material pipa. Sehingga elektron akan bergerak dari anode ke arah material pipa yang dilindungi terhadap pengaruh korosi. Oleh karena itu permukaan pipa akan menjadi katoda dan akan terproteksi.

I.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mendesain sistem proteksi arus paksa (impressed current cathodic protection) pada pipa baja API 5L Grade B yang ditanam di dalam tanah
2. Bagaimana faktor lingkungan dapat mempengaruhi sistem proteksi arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B yang berada di dalam tanah.

I.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini, agar penelitian lebih terarah adalah sebagai berikut :

1. Pipa baja yang digunakan adalah pipa baja API 5L Grade B sepanjang 1.5 meter
2. Komposisi pipa baja API 5L dianggap homogen
3. Anoda yang digunakan adalah anoda grafit dengan backfill grafit serbuk.
4. Komposisi backfill grafit serbuk yang digunakan adalah 98%
5. Tanah yang digunakan adalah bekas tanah rawa
6. Kondisi tanah lingkungan dibiarkan, tanpa ada treatment tertentu.

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah,



1. Merancang sistem proteksi arus paksa (impressed current cathodic protection) pada pipa baja API 5L Grade B yang tepat.
2. Menganalisa faktor lingkungan dapat mempengaruhi sistem proteksi arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B yang berada di dalam tanah.

I.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah

1. Mengembangkan ilmu dibidang korosi khususnya di lingkungan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS
2. Meningkatkan kompetensi dibidang korosi khususnya di lingkungan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS
3. Sebagai studi literatur dalam mengaplikasikan proteksi katodik bagi industri

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Korosi

Korosi di definisikan sebagai penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya (Trethewey, 1991) Maka dapat disimpulkan korosi adalah proses pengrusakan logam dimana logam akan mengalami penurunan mutu (*degradation*) karena bereaksi dengan lingkungan baik secara kimia atau elektrokimia pada waktu pemakaiannya. Terkorosinya suatu logam dalam lingkungan elektrolit adalah suatu proses elektrokimia. Proses ini terjadi bila ada reaksi setengah sel yang melepaskan elektron (reaksi oksidasi pada anodic) dan reaksi setengah sel yang menerima elektron tersebut (reaksi reduksi pada katodik). Kedua reaksi ini akan terus berlangsung sampai terjadi keseimbangan dinamis dimana jumlah elektron yang dilepas sama dengan jumlah elektron yang diterima.

Korosi dapat terjadi jika terdapat :

1. Anoda, Tempat terjadinya reaksi oksidasi dimana ion negatif berkumpul. Anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron – elektron dari atom – atom logam netral untuk membentuk ion ion yang bersangkutan. Ion – ion ini mungkin akan tetap tinggal dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi ini dapat menghalangi pelarutan logam lebih lanjut yang disebut pemasifan dimana reaksi korosi berhenti. Reaksi korosi logam dapat dinyatakan dengan



Dengan banyak elektron yang diambil dari masing masing atom yang ditentukan oleh valensi logam yang bersangkutan. Umumnya $z = 1, 2$ atau 3 .

2. Katoda, tempat terjadinya reaksi reduksi dimana ion positif berkumpul. Pada katoda biasanya tidak mengalami korosi, walau demikian katoda memiliki



kemungkinan untuk mengalami kerusakan dalam kondisi tertentu. Dua reaksi penting yang umum terjadi pada katoda, tergantung pH larutan bersangkutan, adalah :



3. Media elektrolit, sebagai penghantar elektron antara katoda dan anoda. Bersifat menghantarkan listrik
4. Adanya arus listrik akibat pergerakan elektron

II.2 Mekanisme Korosi

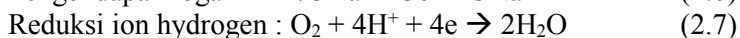
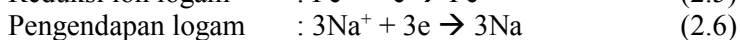
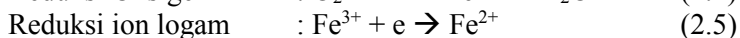
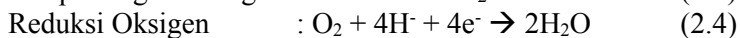
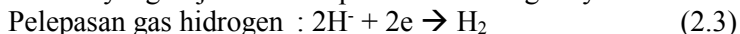
Mekanisme korosi tidak terlepas dari reaksi elektrokimia. Reaksi elektrokimia melibatkan perpindahan elektron – elektron. Perpindahan elektron merupakan hasil reaksi redoks (reduksi – oksidasi). Mekanisme korosi melalui reaksi elektrokimia melibatkan reaksi anodik di daerah anodik. Reaksi anodik (oksidasi) diindikasikan melalui peningkatan valensi atau produk elektron – elektron. Reaksi anodik yang terjadi pada proses korosi logam yaitu :



Proses korosi dari logam M adalah proses oksidasi logam menjadi satu ion (n^+) dalam pelepasan n elektron. Harga dari n bergantung dari sifat logam, sebagai contoh besi :

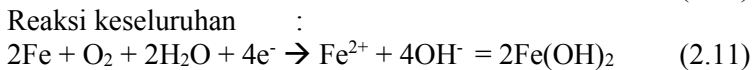
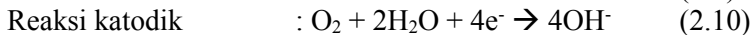
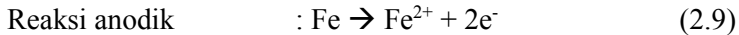


Reaksi katodik juga berlangsung di proses korosi. Reaksi katodik diindikasikan melalui penurunan nilai valensi atau konsumsi elektron – elektron yang dihasilkan dari reaksi anodik. Reaksi katodik terletak di daerah katoda. Beberapa jenis reaksi katodik yang terjadi selama proses korosi logam yaitu





Peristiwa korosi pada struktur pipa, baik yang terjadi dilingkungan tanah dan air harus melibatkan syarat – syarat diatas. Peristiwa korosi pada struktur pipa memiliki reaksi anoda dan katoda :



Pada reaksi (2.9) dan (2.10) melibatkan elektron. Reaksi anodik adalah reaksi perubahan logam baja menjadi ion Fe^{2+} dengan melepaskan 2 elektron dimana terjadi penambahan bilangan oksidasi dari 0 menjadi 2, sedangkan reaksi katodik adalah reaksi pelarutan oksigen O_2 didalam air menjadi ion OH^- dengan membutuhkan 4 elektron dimana terjadi pengurangan bilangan oksidasi 0 menjadi -4. Elektron ini akan mengalir dari reaksi anodik menuju reaksi katodik untuk mencapai kesetimbangan yang dinamis. Pergerakan elektron ini mengakibatkan terjadinya arus listrik yang arahnya berlawanan dengan arah aliran elektron. Arah aliran elektron berasal dari anoda menuju katoda sehingga arah aliran arus listrik berasal dari katoda menuju anoda. Laju korosi secara elektrokimia merupakan kecepatan rata-rata perubahan ketebalan atau berat dari logam yang mengalami korosi terhadap waktu melalui proses elektrokimia (Trethewey, 1991).

II.3 Jenis – Jenis Korosi

II.3.1 Korosi Merata (*Uniform/General Corrosion*)

Adalah korosi yang terjadi pada permukaan logam akibat reaksi kimia karena pH air yang rendah dan udara yang lembab, sehingga makin lama logam makin menipis. Mekanisme korosi ini adalah dengan distribusi seragam dari reaktan katodik atas seluruh permukaan logam yang terekspose, mekanisme korosi merata ini dapat dilihat pada gambar 2.1. Pada lingkungan asam ($\text{pH} < 7$), terjadi reduksi ion hidrogen dan pada lingkungan basa ($\text{pH} > 7$)



atau netral ($\text{pH} = 7$), terjadi reduksi oksigen. Korosi jenis ini yang paling sering, umum dijumpai. Korosi ini dikontrol oleh reaksi kimia atau elektrokimia antara permukaan logam dengan media korosifnya. Biasanya ini terjadi pada pelat baja atau profil, logam homogen. Korosi jenis ini bisa dicegah dengan cara :

- Pemilihan material yang tepat (semakin murni bahan semakin tahan korosi)
- Pelapisan
- Penambahan Inhibitor (media elektrolit)
- Penambahan elemen paduan pada logam
- Proteksi katodik

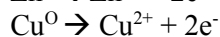
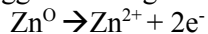


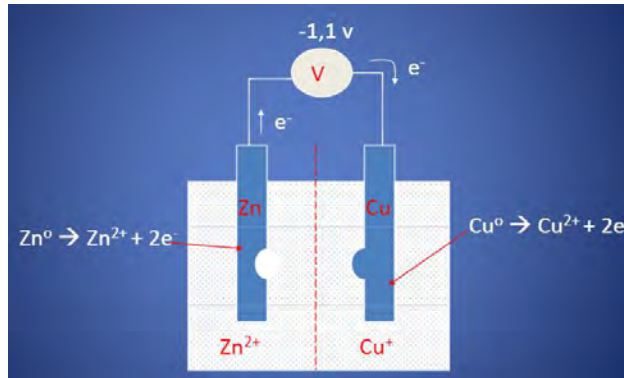
Gambar 2.1 Mekanisme Korosi Merata
(Sumber :Sulistijono)

II.3.2 Korosi Galvanis (*Galvanic Corrosion*)

Bila dua logam yang berbeda saling kontak dan berada pada media/larutan yang konduktif dan korosif maka akan timbul media/larutan yang konduktif dan korosif maka akan timbul “beda potensial” yang menyebabkan terjadinya aliran arus listrik atau perpindahan elektron. Gambar 2.2 menunjukkan prinsip dasar dari korosi galvanik. Sebuah elektroda seng (anoda) dan elektroda tembaga (katoda). Keduanya bias teroksidasi Keduanya bias teroksidasi

Keduanya teroksidasi tetapi tingkat oksidasi Zn lebih besar daripada Cu, sehingga bila keduanya dihubungkan akan terjadi beda potensial sebesar 1,1 volt. Elektroda Cu menerima elektron dari elektroda Zn, sehingga Zn sebagai Anoda (terkorosi)





Gambar 2.2 Mekanisme Korosi Galvanis (Sumber : Sulistijono)

Pengendalian korosi galvanik dapat dilakukan dengan,

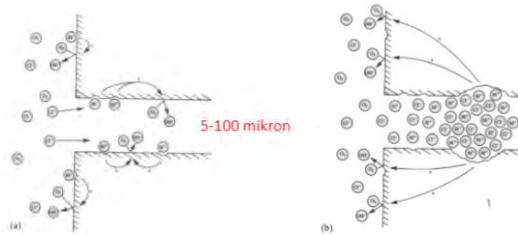
- Memilih material yang memiliki EMF (Electro Motif Force) / Beda Potensial yang kecil atau berdekatan (berdekatan pada deret/seri galvanic).
- Menghindari anoda dengan luas kecil dan katoda dengan luas besar.
- Memisahkan anoda dengan katoda dengan bahan isolator
- Pemberian Coating
- Pemberian inhibitor (zat penghambat) pada media korosif.
- Menghindari sambungan ulir untuk penyambungan dua material yang selisih EMFnya besar
- Membuat anoda yang mudah diganti dan mempunyai beda potensial kecil.
- Memberi logam ketiga yang memiliki EMF kecil

II.3.3 Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)

Merupakan salah satu jenis korosi lokal. Korosi ini disebabkan oleh adanya sejumlah kecil sekali larutan yang terstagnasi (diam) kecil sekali larutan yang terstagnasi (diam), karena adanya hole, gasket. Sambungan penyebab timbulnya



“celah”, sehingga korosi ini sering juga disebut korosi deposit korosi retakan korosi packing, korosi interface, korosi tapal kuda dan korosi garis air, korosi pasak. mekanisme korosi celah ini dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2.3 Mekanisme Korosi Celah (Sulistijono)

Pengendalian korosi celah dapat dilakukan dengan,

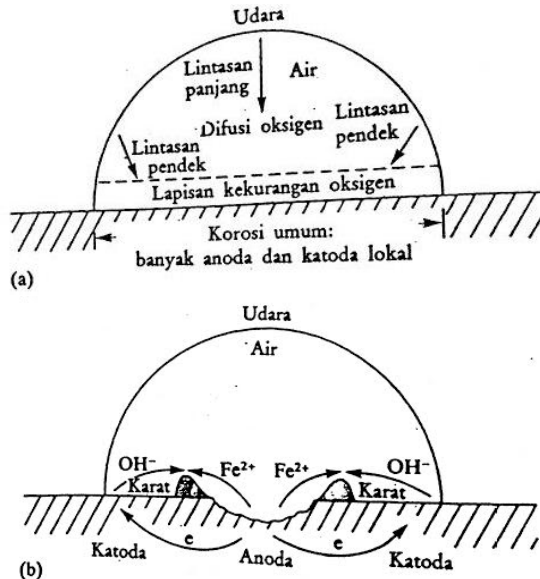
- Menggunakan sambungan las.
- Menutup sambungan non welded dengan las atau solder.
- Menghindari zona stagnasi
- Pemeriksaan secara intensif dan periodic zona celah celah
- Menggunakan media korosif (larutan) yang uniform
- Menghindari packing yang basah
- Menggunakan gasket yang solid

II.3.4 Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)

Adalah korosi yang disebabkan karena komposisi logam yang tidak homogen yang pada daerah batas timbul korosi yang berbentuk sumur. Mekanisme korosi sumuran ini dapat dilihat pada gambar 2.4 Korosi ini menyerang logam yang memiliki

- Selaput pelindung yang robek secara mekanik
- Tegangan konsentrasi local
- Konsentrasi kimia heterogen (inklusi, segregasi, presipitasi)

Korosi sumuran sulit dibedakan dengan korosi celah, korosi celah di picu oleh beda konsentrasi O_2 sementara korosi sumuran dipicu oleh faktor metalurgi.



Gambar 2.4 Mekanisme Korosi Sumuran (Sumber : Trethewey)

II.3.5 Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*)

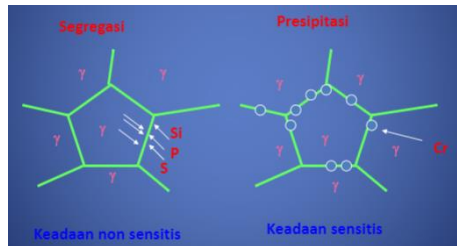
Korosi Erosi adalah korosi yang timbul ketika logam terserang akibat gerak relative antara elektrolit dan permukaan logam. Meskipun proses-proses elektrokimia juga berlangsung, banyak contoh bentuk ini yang terutama disebabkan oleh efek-efek mekanik seperti pengausan, abrasi, dan gesekan. Logam-logam lunak khususnya mudah terkena serangan macam ini, misalnya, tembaga, kuningan, aluminium murni, dan timbal, tetapi kebanyakan logam lain juga rentan terhadap korosi erosi, namun dalam kondisi-kondisi aliran yang tertentu.

II.3.6 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

Korosi ini sering disebut juga sebagai Intergranular Attack (IGA) atau Intergranular Corrosion (IGC). Korosi ini disebabkan oleh orientasi kristalografi yang terjadi secara acak sehingga memunculkan daerah yang tidak stabil dengan energi tinggi



akibatnya dengan mudah terjadi korosi di intergranular atau batas butir. Mekanisme korosi batas butir ini dapat dilihat pada gambar 2.5. Korosi jenis ini sering dijumpai pada material stainless steel austenitik.



Gambar 2.5 Mekanisme Korosi Batas Butir (Sumber : Sulistijono)

Pengendalian korosi celah dapat dilakukan dengan,

- Memperpanjang waktu penahanan pada proses homogenisasi, sehingga konsentrasi Cr merata di setiap titik
- Menurunkan kandungan karbon.
- Menambahkan unsur yang memiliki afinitas tinggi terhadap karbon (Ti, Nb)
- Menambahkan unsur pembentuk fase α .

II.4 Proteksi Katodik

Korosi pada dasarnya merupakan sifat alamiah dari logam untuk kembali ke bentuk semula. Dengan demikian sebenarnya korosi tidak dapat dihilangkan sama sekali. Akan tetapi dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, proses korosi dapat dikendalikan sampai pada titik minimum yang dilakukan berdasarkan proses terjadinya. Salah satu metode pengendalian korosi untuk sistem perpipaan adalah proteksi katodik.

Proteksi katodik untuk pertama kalinya diperkenalkan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1820-an sebagai sarana kontrol korosi utama pada alat pengiriman naval di Inggris. Kemudian lebih dikenal dan banyak dipakai pada tahun 1930-an di Gulf Coast Amerika dalam mengendalikan korosi pada pipa yang membawa



hidrokarbon (gas bumi dan produk minyak) bertekanan tinggi. Di Indonesia metode ini dipergunakan secara lebih luas sejak tahun 1970-an.

Pada dasarnya proteksi katodik merupakan kontrol korosi secara elektrokimia dimana reaksi oksida pada sel galvanis dipusatkan di daerah anoda dan menekan proses korosi pada daerah katoda dalam sel yang sama. Dengan demikian, teknologi ini sebenarnya merupakan gabungan yang terbentuk dari unsur-unsur elektrokimia, listrik dan pengetahuan tentang bahan. Unsur elektrokimia mencakup dasar-dasar proses terjadinya reaksi korosi, sedangkan unsur kelistrikan mencakup konsep dasar perilaku obyek yang diproteksi dan lingkungannya jika arus listrik dialirkan.

II.4.1 Proteksi Katodik Anoda Tumbal (*Sacrificial Anode Cathodic Protection*)

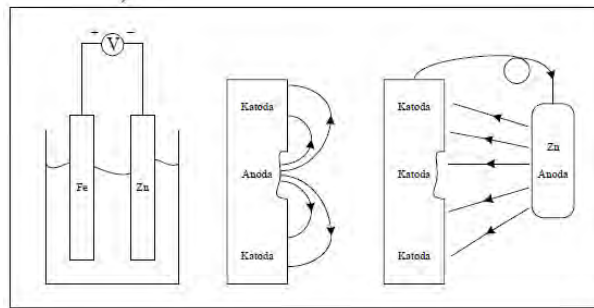
Proteksi katodik metoda anoda tumbal adalah suatu penanggulangan korosi yang memanfaatkan deret galvanik untuk memilih suatu bahan yang bila digandengkan dengan logam yang ingin dilindungi, akan menjadi anoda (Trethewey, 1991). Gambar 2.6 memperlihatkan contoh proteksi katodik metoda anoda tumbal. Karena bahan yang paling sering membutuhkan perlindungan adalah besi baja, maka dapat dilihat dari deret galvanik bahwa semua logam yang potensialnya lebih aktif dibanding besi baja, menurut teori dapat digunakan (Tabel menunjukkan deret potensial standar).

Tabel 2.1 Deret Potensial Standart

Reaksi Elektroda	E^0 (volt)
$\text{Au}^+ + e^- \rightarrow \text{Au}$	+1.68
$\text{Pt}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pt}$	+1.20
$\text{Hg}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Hg}$	+0.85
$\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$	+0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$	+0.34
$2\text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{H}_2$	0.00
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Pb}$	-0.13



$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0.14
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0.25
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0.40
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0.44
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0.71
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0.76
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1.67
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2.34
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2.71
$\text{Ca}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2.87
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2.92



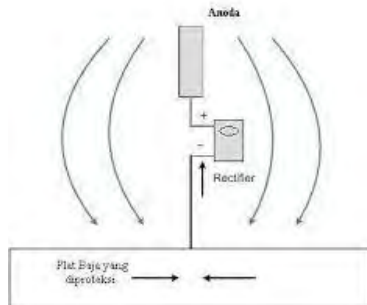
*Gambar 2.6 Skema Proteksi Katodik Anoda Tumbal (Sumber :
Hendra)*

II.4.2 Proteksi Katodik Arus Paksa (*Impressed Current Cathodic Protection*)

Pada sistem arus paksa, sumber arus berasal dari luar, biasanya dari DC atau AC yang dilengkapi dengan penyearah arus (rectifier), dimana kutub negatif dihubungkan ke struktur yang dilindungi dan kutub positif dihubungkan ke anoda. Arus mengalir dari anoda melalui elektrolit ke permukaan struktur, kemudian mengalir sepanjang struktur dan kembali ke rectifier melalui konduktor listrik. Karena struktur menerima arus dari elektrolit, maka struktur menjadi terproteksi. Keluaran (output) arus rectifier



diatur untuk mengalirkan arus yang cukup sehingga dapat mencegah arus korosi yang akan meninggalkan daerah anoda pada struktur yang dilindungi. Mekanisme sistem proteksi katodik arus paksa ini dapat dilihat pada gambar 2.7



*Gambar 2.7 Skema Proteksi Katodik Arus Paksa (Sumber :
Hendra)*

Sistem arus paksa digunakan untuk melindungi struktur yang besar atau membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dan dipandang kurang ekonomis jika menggunakan anoda korban. Sistem ini dapat dipakai untuk melindungi strktur baik yang tidak dicoating, kondisi coating yang kurang baik maupun kondisi coating yang baik. Kelebihan dari sistem arus paksa ini adalah dapat didesain untuk aplikasi dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas output arus yang luas. Artinya kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan output sesuai dengan kebutuhan, kelebihan lain dari sistem ini dengan hanya memasang sistem di salah satu tempat dapat memproteksi yang cukup besar. Kekurangan sistem ini yaitu memerlukan perawatan yang lebih banyak dibanding sistem anoda korban sehingga biaya operasi akan bertambah, sistem ini juga mempunyai ketergantungan terhadap kehandalan pasokan energi (*rectifier*) sehingga kerusakan pada sistem ini akan berakibat fatal terhadap kinerja sistem proteksi, disamping itu ada kemungkinan dapat menimbulkan masalah efek interferensi arus terhadap struktur disekitarnya.



II.5 Anoda

Pada sistem arus paksa disamping anoda sebagai sumber electron juga dibutuhkan sumber arus seperti *rectifier* yang dihubungkan dengan anoda. Pada metode arus paksa, anoda tidak dipilih dari logam dengan potensial elektrode lebih negatif dari logam yang dilindungi, tetapi justru dipilih dari logam mulia. Meskipun potensial electrode anoda tersebut lebih besar daripada pipa baja, elektron tetap mengalir dari anoda menuju pipa karena dipaksa oleh arus searah (DC) yang diperoleh dari *transformer rectifier*. Dengan demikian suatu struktur yang memiliki luasan besar dapat dilindungi oleh sebuah anoda tunggal dan karena tegangan dorong yang dimiliki tinggi, anoda dapat ditempatkan jauh dari struktur. Anoda untuk metoda arus paksa umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga tipe :

1. Anoda tipe aktif (terkonsumsi cepat) : besi atau baja
2. Anoda semi-pasif (semi-terkonsumsi) : grafit, timbal, besi-silikon.
3. Anoda pasif sempurna (tidak terkonsumsi) : terbuat dari platina.

Tabel 2.2 Jenis dan Spesifikasi Anoda

Material Anoda	Aplikasi Khusus	Typical Loss (Lb/A.Y)
Scrap Steel	Tanah, air tawar/laut	20
Aluminium	Tanah, air tawar/laut	10-12
Grafit	Tanah, air Tawar	0.25-5.0
High Silicon Iron dan Si-Cr Iron	Tanah, air tawar/laut	0.25-5.0
Timah	Air laut	0.1-0.25
Platinum	Air laut	kosong



Titanium		
----------	--	--

Sumber : Supomo, 1995

II.6 Kelembaban Tanah

Kelembaban (*moisture content*) adalah banyaknya jumlah air pada udara. Dimana di dalam tanah terdapat komposisi udara dan air yang dapat berubah-ubah apabila terjadi proses penambahan atau pengurangan air di tanah tersebut (Rhamdani.2008). Air merupakan elektrolit yang memicu reaksi elektrokimia sehingga menyebabkan korosi. Banyaknya kandungan air dalam tanah dapat menentukan kemampuan tanah sebagai media elektrolit dalam reaksi korosi. Dengan jumlah yang banyak, kandungan air yang berada di tanah dapat mengalirkan elektron sehingga peristiwa terjadinya korosi sangat rentan terjadi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh aliran air jenuh dan tidak jenuh pada tanah yang berhubungan dengan pergerakan air dari daerah yang basa men uju daerah yang kering. Kejenuhan air bergantung dari ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur, dan bahan organik.

Korosi pada tanah adalah jenis *aqueous* dengan mekanisme elektrokimia. Kondisi pada tanah dapat menggeser atmosferik menjadi keadaan *immersed* tergantung dari kepadatan tanah dan kadar kristal air. Banyak karakteristik tanah yang akan meningkatkan korosifitas seperti hujan, iklim, maupun reaksi pada tanah, meskipun mekanismenya merupakan elektrokimia.

Air mempunyai pengaruh dalam terjadinya korosi pada tanah. Pada tanah dibutuhkan untuk oksidasi pada permukaan permukaan logam dan juga dibutuhkan untuk ionisasi elektrolit tanah digunakan untuk melengkapi sirkulasi aliran arus pada aktivitas korosi. Kelembapan tanah sangatlah penting terhadap mekanisme korosi, tanah yang basah akan lebih korosif dibandingkan dengan tanah kering.

II.7 Resistivitas Tanah

Resistivitas suatu jenis tanah adalah kemampuan tanah tersebut untuk menghambat aliran listrik. Jika resistivitas tanah



rendah maka arus listrik semakin mudah mengalir begitu juga sebaliknya. Tanah mempunyai karakter kimiawi dan fisik yang bervariasi dan dapat mempengaruhi tingkat korosi pada logam. Pada umumnya tanah mengandung empat unsur utama, yaitu bahan mineral, bahan organik air dan udara. Karakteristik tanah yang berpengaruh terhadap tingkat korosi yang dihasilkan adalah resistivitas tanah.

Resistivitas jenis suatu tanah ditentukan oleh jumlah ion dalam tanah sebagai elektrolit karena arus listrik mengalir dalam elektrolit melalui mekanisme perpindahan ion-ion tersebut. Jika jumlah ion yang terdapat dalam tanah banyak maka komponen pembawa aliran listrik semakin banyak dan arus mudah mengalir. Dengan kata lain resistivitas tanah semakin rendah, proses korosi semakin meningkat dan sebaliknya. Survei tahanan jenis (resistivitas) tanah mutlak dilakukan pada tahap awal perencanaan teknis sistem proteksi katodik.

Tahanan jenis tanah merupakan fungsi dari kandungan kelembaban, kandungan garam, jenis garam dan temperatur tanah. Secara umum, terdapat pertalian antara tahanan jenis tanah dengan laju korosi. Hal ini disebabkan korosi merupakan suatu fenomena elektrokimia sehingga semakin rendah tahanan jenis tanah, hambatan sirkuit yang dihasilkan juga semakin kecil. Akibatnya, sel-sel korosi mampu mengalirkan arus korosi dengan lebih mudah dan laju korosi dipercepat. (Arnoux, 2002)

Tabel 2.3 Klasifikasi Resistivitas Tanah

Rentang Resistivitas (Ohm – cm)	Klasifikasi Resistivitas	Antisipasi Aktivitas Korosi
0 – 2.000	Rendah	Sangat Tinggi
2.000 – 10.000	Sedang	Tinggi
10.000 – 30.000	Tinggi	Sedang
Lebih dari 30.000	Sangat Tinggi	Rendah

Sumber : A.Sulaiman, Karyanto H.1992 “Corrosion control dan Monitoring”, Jakarta: Workshop Pertamina



Nilai hasil pengukuran mencerminkan sifat kelistrikan dari media elektrolit yang mempengaruhi kemampuan arus korosi untuk mengalir melalui media tersebut. Oleh karena itu pada perancangan sistem proteksi katodik, tujuan dan dari survey resistivitas tanah adalah untuk mengetahui tingkat kekorosifan masing-masing lingkungan tanah yang dilalui struktur. Selanjutnya dari nilai tersebut dapat ditentukan tipe sistem proteksi katodik yang akan diaplikasikan, arus perlindungan yang diperlukan, jumlah anoda, dan lokasi pemasangan anoda *groundbed*. (Parker, 1984)

II.8 Lapisan Pelindung

Lapis lindung merupakan lapisan film kontinu dari material penyekat listrik di atas permukaan logam yang diproteksi. Material ini mengisolasi logam dari kontak langsung dengan elektrolit di sekelilingnya (mencegah elektrolit terhubung dengan logam) sekaligus sebagai penghalang yang memberikan hambatan listrik tinggi sehingga reaksi-reaksi elektrokimia tidak dapat terjadi. Fungsi primer lapis lindung pada pipa yang terproteksi katodik adalah mengurangi luasan permukaan logam yang terekspos pada pipa sehingga arus proteksi katodik yang diperlukan untuk melindungi logam dapat dikurangi. (Peabody, 2001)

Menurut NACE Standards RP0169-96 Section 5, lapis lindung sebagai sarana pengendali korosi yang efektif memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Penyekat listrik yang efektif
2. Penghalang uap (kelembapan) efektif.
3. Mampu diaplikasikan.
4. Sejalan dengan waktu mampu menahan perkembangan *holidays*.
5. Memiliki adhesi yang baik terhadap permukaan pipa.
6. Mampu menahan kerusakan akibat perawatan normal, penyimpanan (degradasi sinar ultra violet), dan pemasangan.



7. Sejalan dengan waktu, mampu memelihara tahanan jenis listrik secara konstan.
8. Ketahanan terhadap *disbonding*.
9. Mudah diperbaiki.
10. Interaksi dengan lingkungan tidak menghasilkan zat beracun.

II.9 Potensial Proteksi

British Standard Institute (BSI) Code Of Practice For Cathodic Protection memberikan nilai-nilai tegangan perlindungan logam terhadap elektrolit yang diukur terhadap bermacam-macam elektroda referens.

Tabel 2.4 Nilai Elektroda Acuan

Elektroda Reference	Lingkungan Aerobik	Lingkungan Anaerobik
Cu/CuSO ₄	-0.85 mV	-0.95 mV
Ag / AgCl Air Laut	-0.80 mV	-0.90 mV
Ag / AgCl KCl Jenuh	-0.75 mV	-0.85 mV
Zn / Air Laut	+0.25 mV	+0.15 mV

Sumber : BS 7361 Part 1 Cathodic Protection. Part 1 Code of Practice for Marine and Land Application

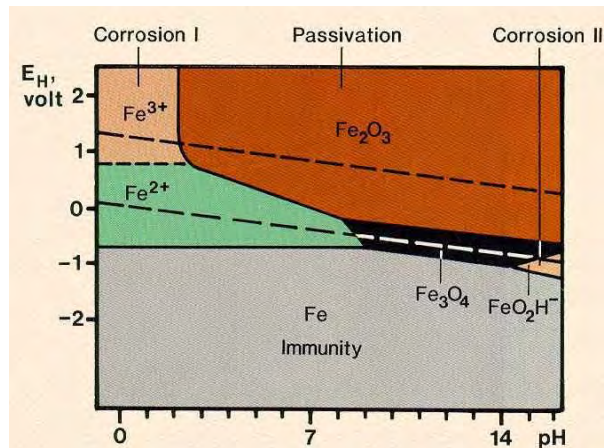
II.10 Diagram Pourbaix (E/pH)

Diagram Pourbaix adalah diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi yang terjadi secara termodinamika, atau dapat dikenal juga dengan diagram kesetimbangan E-pH. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi reaksi dan produk korosi dari suatu material pada lingkungan dengan derajat keasaman tertentu. Namun, diagram ini tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi dari material tersebut. Gambar diagram pourbaix ditunjukkan pada gambar 2.8.



Dalam suatu diagram pourbaix, keadaan suatu logam terbagi 3, yaitu

1. **Imun**
Adalah daerah dimana logam dalam berada keadaan aman dan terlindung dari peristiwa korosi.
2. **Passive**
Adalah daerah dimana logam akan membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan dan terlindung dari peristiwa korosi.
3. **Corrosion**
Adalah daerah dimana logam akan mengalami peristiwa korosi.



Gambar 2.8 Diagram Pourbaix Fe (Sumber : CorrosionClinic)

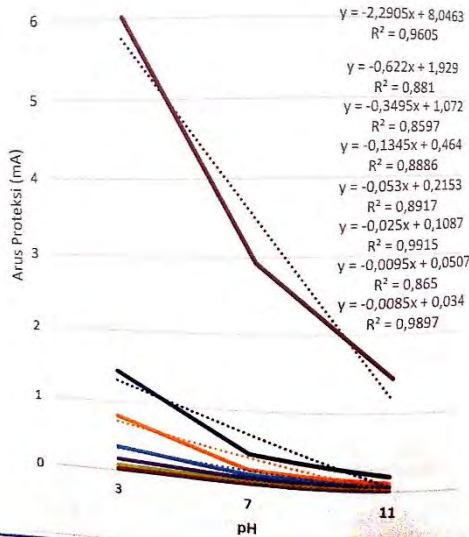
II.11 Acuan Penelitian

II.11.1 Pengaruh Variasi Cacat Goresan Lapis Lindung dan Variasi pH Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B (Trendy,2015)

Korosi merupakan hal yang tidak bisa dihindari dari sistem perpipaan bawah tanah dan menjadi penyebab utama kegagalan



dari material pipa tersebut. Upaya pengendalian korosi terhadap pipa-pipa tersebut dapat dilakukan dengan cara memberikan coating atau lapis lindung serta menerapkan sistem proteksi katodik, dalam hal ini sistem yang dipakai adalah sistem *Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)* meskipun coating sudah diberikan kemungkinan terjadi kerusakan pada coating tersebut sangatlah besar. Adanya goresan saat proses pengiriman pipa ataupun saat pemasangan pipa menjadi penyebab kerusakan pada coating. Dengan adanya kerusakan coating, maka kemungkinan untuk terjadinya korosi menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan bagian material yang tergores (tidak terlindungi coating) akan berinteraksi secara langsung dengan lingkungan. Maka dari itu, diperlukan arus tertentu pada sistem ICCP agar material pipa tetap dalam keadaan terproteksi. Selain faktor adanya goresan yang terdapat pada pipa, faktor lingkungan yang mana dalam hal ini pH tanah juga turut memberikan pengaruh terhadap kebutuhan arus pada sistem proteksi ICCP. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk mengetahui besarnya supply arus proteksi sistem ICCP ketika dalam sebuah sistem perpipaan mengalami kerusakan pada coating dan berada di lingkungan dengan pH tertentu



Gambar 2.9 Pengaruh pH Pada Kebutuhan Arus Proteksi
(Sumber : Trendy)

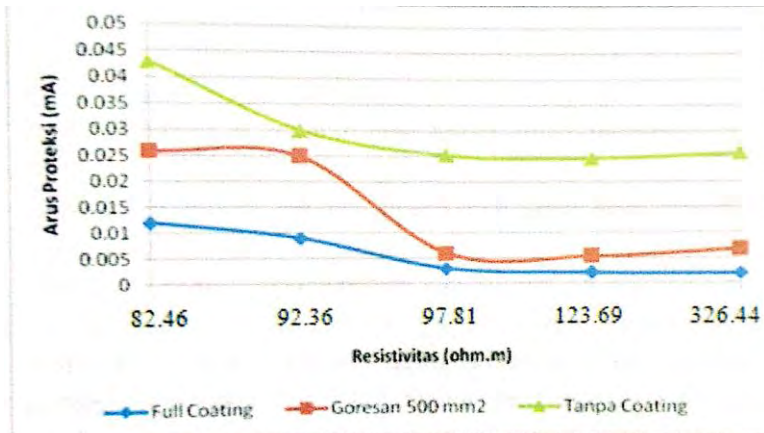
Dari hasil penelitian dilihat dari gambar 2.9 didapat pada tanah dengan kadar asam tinggi (pH = 3) kebutuhan arus akan meningkat, semakin rendah kadar asam (pH = 7) kebutuhan arus akan menurun.

II.11.2 Pengaruh Variasi Resistivitas Tanah dan Kadar Air Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa API 5L Grade B dengan Variasi Goresan Lapis Lindung (Arini,2015)

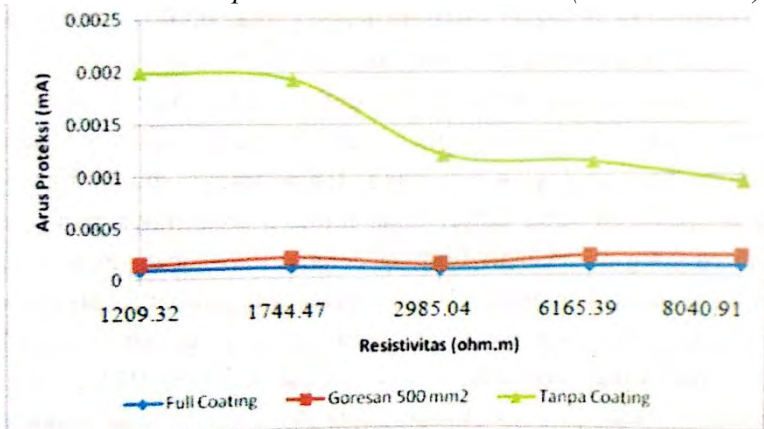
Metode yang sering kali digunakan untuk mengurangi korosi pada pipa bawah tanah adalah pemberian lapis lindung dan instalasi ICCP. Faktor lingkungan yang menjadi salah satu indikator utama terhadap korosi pada tanah terhadap kebutuhan arus proteksi sistem ICCP pada material pipa API 5L Grade B sebagai katoda yang diberi variasi coating (coating seluruhnya, tanpa coating dan cacat gores berbentuk persegi dengan luas 500mm²). Variasi kadar air 0% (kondisi kering) dan 25%. Anoda menggunakan grafit, rectifier sebagai penyearah arus dan elektroda



referensi Cu/CuSO_4 sebagai elektroda acuan. Pengukuran arus proteksi dilakukan selama 7 hari dengan pengambilan data setiap hari.



Gambar 2.10 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Resistivitas Tanah pada Kadar Air Tanah 25% (Sumber : Arini)



Gambar 2.11 Grafik Perbandingan Nilai Arus Proteksi dengan Resistivitas Tanah pada Kadar Air 0% (Sumber : Arini)

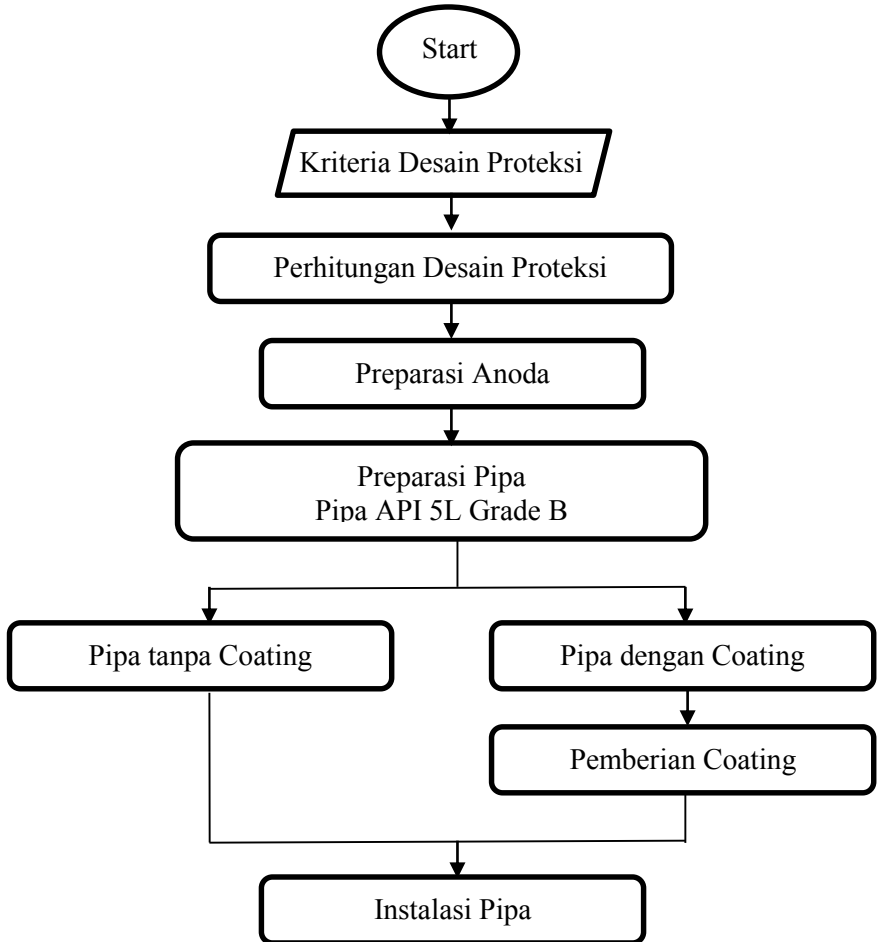
Dari hasil penelitian terlihat melalui gambar 2.10 dan 2.11 bahwa dengan bertambahnya kadar air dalam tanah akan menyebabkan

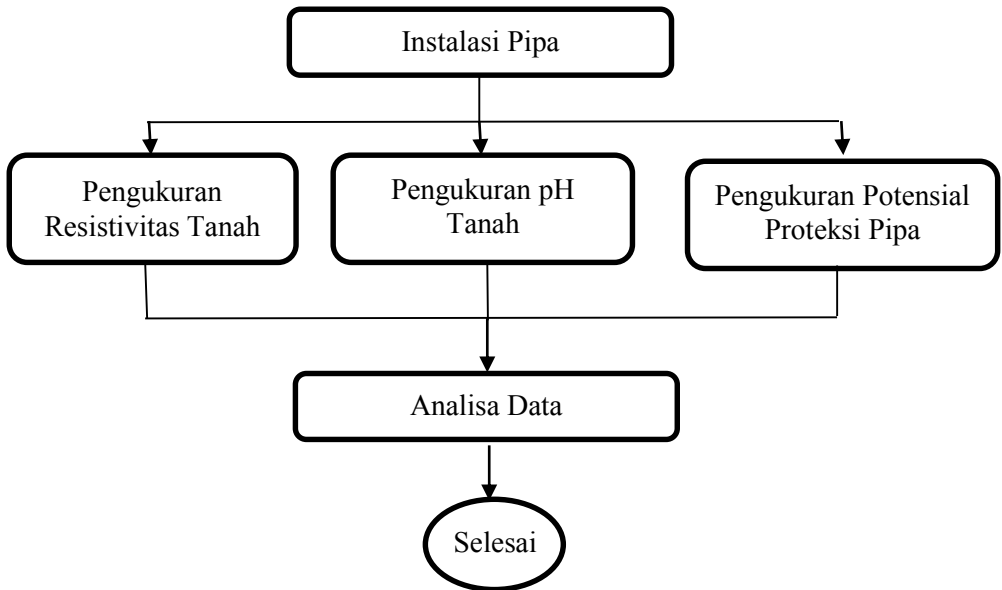


nilai resistivitas tanah akan menurun, karena bertambahnya jumlah air dalam tanah akan mempermudah aliran arus. Nilai resistivitas tanah yang semakin tinggi akan membutuhkan arus proteksi yang rendah, dikarenakan pada tanah dengan nilai resistivitas tinggi memiliki memiliki tahanan yang tinggi (lemah menghantar listrik atau bersifat isolator). Sedangkan dengan kadar air tanah yang tinggi nilai arus proteksi akan meningkat, karena air mempermudah ionisasi elektron dalam tanah, sehingga mempermudah aliran arus.

BAB III METODE PENELITIAN

III.1 Diagram Alir



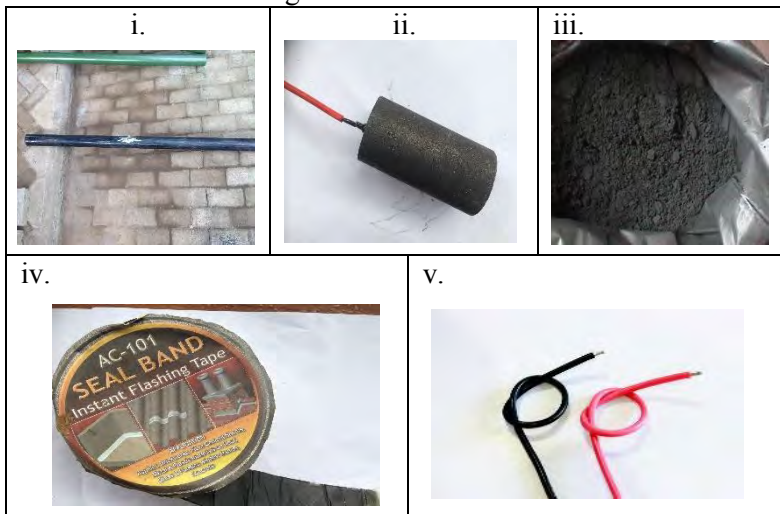




III.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa Pada Baja API 5L dengan Coating dan Tanpa Coating di dalam tanah yaitu

1. Pipa Baja API 5L Grade B
2. Anoda Grafit
3. Serbuk Grafit
4. Coating Wrapping (Lem Talang)
5. Kabel Tembaga



Gambar 3.1 Bahan Penilitan (i) Pipa Baja API 5L Grade B, (ii) Anoda Grafit, (iii) Grafit Serbuk, (iv) Coating Wrapping/Lem Talang, (v) Kabel Tembaga

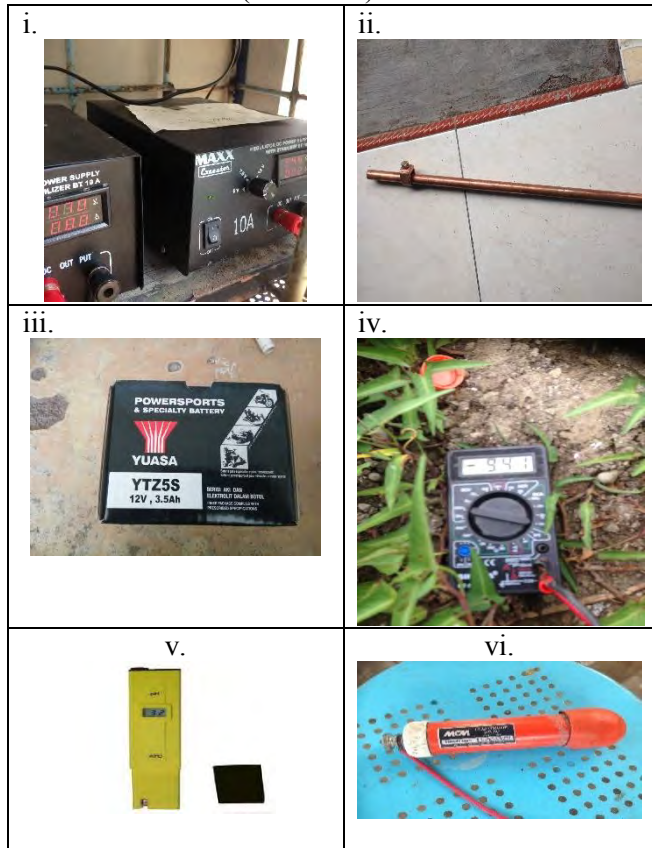
III.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada Perancangan Proteksi Katodik Arus Paksa Pada Baja API 5L dengan Coating dan Tanpa Coating di dalam tanah yaitu,

1. Transformator Rectifier
2. Copper rod
3. Aki
4. Multitester



5. pH Meter
6. Elektroda Referens (CuCuSO_4)



Gambar 3.2 Peralatan Penelitian (i) Transformator Rectifier, (ii) Copper rod, (iii) Aki, (iv) Multitester, (v) pH Meter. (vi) electrode Referens Cu/CuSO_4

III.4 Langkah Perancangan

Langkah langkah yang dilakukan untuk mendukung perancangan tersebut antara lain,

1. Pengumpulan data
2. Melakukan kriteria desain



Kriteria desain yang akan digunakan adalah,

Umur desain : 1 tahun

Limit positif : -850 mV

Limit negatif : -1100 mV

Electrode Reference : Cu/CuSO₄

3. Standart perancangan

Desain sistem proteksi katodik arus paksa mengikuti standar :

- NACE Standard SP-0169-2013 *Control Of External Corrosion Of Underground or Submerged Metallic Piping System*
- NACE Standard RP-0286-97 *Electrical Isolation Of Cathodically Protected Pipelines*
- DNV-RP-B401 *Cathodic Protection Design*
- A.W. Peabody, *Control of Pipeline Corrosion* (Second Edition), NACE International The Corrosion Society

4. Pengujian resistivitas tanah

Pengujian dan pengukuran resistivitas tanah mengikuti standar ASTM G57 *Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode Method*, seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pengukuran Resistivitas Tanah



5. Pengujian pH tanah

Pengujian dan pengukuran pH tanah mengikuti SOP Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 *Standard Operation Procedure pH Soil Determination*, seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Pengukuran pH tanah

6. Desain proteksi arus paksa

Untuk mengetahui arus dan tegangan yang diperlukan. Maka perhitungan dimulai dengan

- a. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$A = \pi \times D \times L \quad (3.1)$$

Dengan :

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m^2)

- b. Konduktansi Lapis Pelindung

$$g = \frac{\pi \times D}{\omega} \quad (3.2)$$



Dengan :

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m^{-1})

D = diameter luar pipa (m)

ω = tahanan lapis lindung pipa (ohm-m^2)

$\pi = 3,14$

c. Tahanan Pipa

$$r = \frac{P_{\text{pipa}}}{\pi t (D-t)} \quad (3.3)$$

Dengan :

r = tahanan pipa (ohm-m^{-1})

P_{pipa} = tahanan spesifik pipa (ohm-m) (peabody)

t = tebal pipa (m)

D = diameter luar pipa (m)

d. Konstanta Atenuasi

$$\alpha = \sqrt{r \times g} \quad (3.4)$$

Dengan :

α = konstanta attenuasi (ohm-m^{-1})

r = tahanan pipa (ohm-m^{-1})

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m^{-1})

e. Tahanan Karakteristik Pipa

$$r_p = \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (3.5)$$

Dengan :

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

r = tahanan pipa (ohm-m^{-1})

g = konduktansi lapis lindung pipa (ohm-m^{-1})

f. Pergeseran Potensial Pipa

$$E_o = E \times \cosh \alpha \times L \quad (3.6)$$

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

E = pergeseran potensial pipa minimum (volt)

α = konstanta attenuasi

L = jarak pipa terproteksi (m)

g. Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_o = \frac{E_o}{r_p} \times \tanh \alpha \times L \quad (3.7)$$

Dengan :



I_o = keperluan arus proteksi (Ampere)

E_o = pergeseran potensial pipa (volt)

r_p = tahanan karakteristik pipa (ohm)

α = konstanta attenuasi

h. Keperluan Arus DC Minimum

$$IR \geq I_o \times Sf \quad (3.8)$$

Dengan :

IR = keperluan arus DC minimum (ampere)

I_o = keperluan arus proteksi (ampere)

i. Berat Anoda

$$W_o = \frac{Y \times C \times IR}{U} \quad (3.9)$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)

Y = lama proteksi (tahun)

C = laju konsumsi anoda ($\text{kg}/\text{Ampere tahun}$)

IR = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)

j. Jumlah Anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{W_o}{W} \times Sf \quad (3.10)$$

Dengan :

n = jumlah anoda

W_o = berat anoda total (Kg)

W = berat anoda standar (Kg)

Sf = safety factor (1,25)

k. Tahanan Anoda Tunggal

$$R_h = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Dengan :

R_h = tahanan anoda tunggal (ohm)

ρ = resistivitas tanah rata rata (ohm-cm)

L = panjang anoda (cm)

d = diameter anoda (cm)

l. Tahanan Kabel

$$R_c = \frac{\rho \times l}{A} \quad (3.12)$$



Dengan :

ρ = massa jenis kabel tembaga (0.167

$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)

l = panjang kabel (m)

A = luas penampang kabel (mm^2)

1. Tegangan yang diperlukan

$$V_o = IR \times ((Rh + Rc + rp + \rho) + e) \times Sf \quad (3.13)$$

Dengan :

V_o = tegangan yang diperlukan (volt)

IR = keluaran arus DC (ampere)

Rh = tahanan anoda tunggal (ohm)

Rc = tahanan kabel (ohm)

Rp = tahanan karakteristik (ohm)

ρ = resistivitas tanah (ohm.cm)

Sf = safety factor (1.25)

Rp = tahanan karakteristik pipa (ohm)

e = tegangan dalam (volt)

7. Instalasi peralatan

- a. Preparasi Pipa

Pipa yang digunakan adalah pipa baja API 5L grade B, pengukuran pipa digunakan agar dapat mengetahui luas permukaan yang akan dilindungi, Dari pengukuran didapat panjang sebesar 150cm, diameter pipa sebesar 7.36cm, dan tebal pipa sebesar 0.64cm.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Pipa API 5L Grade B

No.	Kandungan	Kadar (%)
1.	C	0.20
2.	Mn	0.43
3.	P	0.015



4.	S	0.007
5.	Cr	0.014
6.	Ni	0.006
7.	Mo	0.0016
8.	Cu	0.008
9.	B	0.0001
10.	Nb	0.0008
11.	V	0.0013
12.	Ti	0.0015
13.	Al	0.005
14.	Si	0.23

Sumber : API Specification 5L. 2004



(a)



(b)



(c)

*Gambar 3.5 Pengukuran Pipa Baja API 5L Grade B.
(a) Pengukuran Panjang Pipa, (b) Pengukuran
Diameter Luar Pipa, (c) Pengukuran Diamter Dalam
Pipa*

Pipa juga dibersihkan dari pengotor yang menempel



Gambar 3.6 Pembersihan Pipa dari pengotor
Pipa baja diberikan pengait kabel yang dilas pada permukaan kabel, agar pemasangan kabel menjadi lebih mudah



Gambar 3.7 Pengait kabel pada pipa baja

- b. Pemberian Coating
Pipa dibagi menjadi dua, salah satu pipa diberikan *coating wrapping* (lem talang).



Gambar 3.8 Pemberian Coating dengan Wrapping
Sementara pipa yang lain dibiarkan tanpa mengalami proses coating



Gambar 3.9 Pipa yang tidak diberi coating

c. Preparasi anoda

Anoda yang digunakan adalah anoda grafit. Dengan dimensi anoda adalah panjang 8 cm dan diameter 4 cm.



(a)



(b)

Gambar 3.10 Pengukuran anoda grafit. (a) Pengukuran panjang anoda grafit, (b) Pengukuran diameter anoda grafit

Bagian atas dari anoda kemudian sedikit dilubangi sebagai tempat sambungan kabel, Anoda kemudian diberikan backfill yang berasal dari serbuk grafit dan diberikan casing yang berasal dari logam.



Gambar 3.11 Anoda yang telah diberi sambungan kabel

d. Instalasi Pipa

Pipa kemudian dikaitkan kabel pada tempat pengait yang sudah dilas pada pipa, kabel yang digunakan adalah kabel tembaga sehingga dapat menghantarkan listrik dengan baik. Kabel yang berasal dari pipa dihubungkan dengan kutub negative dari rectifier, sementara kabel yang berasal dari anoda dihubungkan menuju kutub positif rectifier.

e. Penanaman pipa dan grafit

Pipa dan grafit ditanam di dalam tanah hingga kedalaman sekitar 50 cm. dengan jarak antara grafit dengan pipa adalah 30 cm.



Gambar 3.12 Pipa dan grafit ditanam di kedalaman 50 cm

f. Pemberian arus proteksi

Setelah pipa dan grafit tertanam, rectifier dinyalakan dan tegangan dari rectifier diatur hingga pipa terproteksi.

8. Pengujian tegangan proteksi

Pengujian yang dilakukan adalah menguji apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk kedalam area proteksi yaitu sekitar -850mV sampai dengan -1100mV dengan menggunakan electrode CuCuSO_4 sebagai reference



Gambar 3.13 Pengukuran tegangan proteksi

9. Analisa hasil

Analisa yang dilakukan adalah melihat bagaimana pengaruh lingkungan dalam hal ini resistivitas tanah mempengaruhi keperluan arus proteksi.

10. Evaluasi

Evaluasi yang dilakukan adalah dengan melihat hasil pipa yang telah diberikan proteksi katodik arus paksa selama selang waktu yang telah ditentukan dan melihat anoda yang digunakan dalam proteksi arus paksa.

11. Kesimpulan

Sistem proteksi katodik arus paksa pada baja API 5L di nyatakan berhasil apabila apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk kedalam area proteksi yang sudah di tentukan dan tidak terjadi kegagalan pada sistem proteksi tersebut.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Hasil Perancangan Proteksi

IV.1.1 Perancangan ICCP pada Pipa Tanpa Coating

Perancangan proteksi katodik dimulai dengan menetapkan kriteria desain yaitu

Umur desain : 1 tahun

Limit positif : -850 mV

Limit negatif : -1100 mV

Electrode Reference : Cu/CuSo₄

Kemudian lanjut ke perhitungan keperluan arus proteksi.

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$\begin{aligned} A &= \pi \times D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0736 \times 1.5 \\ &= 0.346656 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

2. Konduktan Lapisan Pelindung

$$\begin{aligned} g &= \frac{\pi \times D}{\omega} \\ &= \frac{3.14 \times 0.0736}{10} \\ &= 0.0246804 \text{ Ohm.m}^{-1} \end{aligned}$$

3. Tahanan Pipa

$$\begin{aligned} r &= \frac{P_{\text{pipa}}}{\pi t (D - t)} \\ &= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)} \\ &= 0.058647066 \text{ Ohm/m} \end{aligned}$$

4. Konstanta Attenuasi

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{r \times g} \\ &= \sqrt{0.058647066 \times 0.0246804} \\ &= 0.038045145 \end{aligned}$$

5. Tahanan Karakteristik Pipa



$$rp = \sqrt{\frac{r}{g}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.058647066}{0.0246804}}$$

$$= 1.541512484 \text{ Ohm}$$

6. Pergeseran Potensial Pipa

$$Eo = E \times \cosh \alpha \times L$$

$$= 0.45 \times \cosh 0.038045145 \times 1.5$$

$$= 0.450732962 \text{ Volt}$$

7. Kebutuhan Arus Proteksi

$$Io = \frac{Eo}{rp} \times \tanh \alpha \times L$$

$$= \frac{0.450732962}{1.541512484} \times \tanh 0.038045145 \times 1.5$$

$$= 0.016668314 \text{ Ampere}$$

$$= 16.668314 \text{ mA}$$

8. Keluaran Arus DC Minimum

$$IR \geq Io \times Sf$$

$$IR \geq 16.66 \times 1.25$$

$$IR \geq 20.835392 \text{ mA}$$

9. Berat Anoda

$$Wo = \frac{Y \times C \times IR}{U}$$

$$= \frac{1 \text{ tahun} \times 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{A}} \cdot \text{tahun} \times 20.835392 \text{ mA}}{80\%}$$

$$= 0.002604424 \text{ kg}$$

10. Jumlah anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{Wo}{W} \times Sf$$

$$= \frac{0.002604424}{0.5} \times 1.25$$

$$= 0.00651106 \text{ Buah} \approx 1 \text{ Buah}$$



11. Tahanan Anoda Tunggal

$$\begin{aligned} Rh &= \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \\ &= \frac{200}{2 \times 3.14 \times 1.5} \left(\ln \frac{4(8)}{4} - 1 \right) \\ &= 10.78045462 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

12. Tahanan Kabel

$$\begin{aligned} Rc &= \frac{\rho \times l}{A} \\ &= \frac{0.0167 \times 30}{2.5} \\ &= 0.2004 \text{ Ohm} \end{aligned}$$

13. Tegangan yang diperlukan

$$\begin{aligned} Vo &= IR \times ((Rh + Rc + rp + \rho) + e) \times Sf \\ &= 20.835392 \times ((10.78045462 + 0.2004 + \\ &\quad 1.541512484 + 200) + 2) \times 1.25 \\ &= 5.58707212 \text{ v} \end{aligned}$$

Perancangan sistem proteksi arus paksa pada pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 16.67 mA.

IV.1.2 Perancangan ICCP pada Pipa Coating

Perancangan proteksi katodik dimulai dengan menetapkan kriteria desain yaitu

Umur desain : 1 tahun

Limit positif : -850 mV

Limit negatif : -1100 mV

Electrode Reference : Cu/CuSo₄

Kemudian lanjut ke perhitungan keperluan arus proteksi.

1. Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$\begin{aligned} A &= \pi \times D \times L \\ &= 3.14 \times 0.0736 \times 1.5 \\ &= 0.346656 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

2. Konduktan Lapisan Pelindung

$$g = \frac{\pi \times D}{\omega}$$



- $$= \frac{3.14 \times 0.0736}{35}$$
- $$= 0.006603 \text{ Ohm} \cdot \text{m}^{-1}$$
3. Tahanan Pipa
- $$r = \frac{P_{\text{pipa}}}{\pi t (D - t)}$$
- $$= \frac{0.0000792}{3.14 \times 0.0064 (0.0736 - 0.0064)}$$
- $$= 0.058647066 \text{ Ohm/m}$$
4. Konstanta Attenuasi
- $$\alpha = \sqrt{r \times g}$$
- $$= \sqrt{0.058647066 \times 0.006603}$$
- $$= 0.019679 \text{ Ohm} \cdot \text{m}^{-1}$$
5. Tahanan Karakteristik Pipa
- $$r_p = \sqrt{\frac{r}{g}}$$
- $$= \sqrt{\frac{0.058647066}{0.006603}}$$
- $$= 2.980255 \text{ Ohm}$$
6. Pergeseran Potensial Pipa
- $$E_o = -E \times \cosh \alpha \times L$$
- $$= 0.45 \times \cosh 0.019679 \times 1.5$$
- $$= 0.450196 \text{ Volt}$$
7. Kebutuhan Arus Proteksi
- $$I_o = \frac{E_o}{r_p} \times \tanh \alpha \times L$$
- $$= \frac{0.450732962}{2.980255} \times \tanh 0.019679 \times 1.5$$
- $$= 0.004458 \text{ Ampere}$$
- $$= 4.457658 \text{ mA}$$
8. Keluaran Arus DC Minimum
- $$IR \geq I_o \times Sf$$



$$IR \geq 0.004458 \times 1.25$$

$$IR \geq 5.572066 \text{ mA}$$

9. Berat Anoda

$$Wo = \frac{Y \times C \times IR}{U}$$

$$= \frac{1 \text{ tahun} \times 0.1 \frac{\text{kg}}{\text{A}} \cdot \text{tahun} \times 5.572066 \text{ mA}}{80\%}$$

$$= 0.000697 \text{ kg}$$

10. Jumlah anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{Wo}{W} \times Sf$$

$$= \frac{0.000697}{0.5} \times 1.25$$

$$= 0.00651106 \text{ Buah} \approx 1 \text{ Buah}$$

11. Tahanan Anoda Tunggal

$$Rh = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right)$$

$$= \frac{200}{2 \times 3.14 \times 1.5} \left(\ln \frac{4(8)}{4} - 1 \right)$$

$$= 10.78045462 \text{ Ohm}$$

12. Tahanan Kabel

$$Rc = \frac{\rho \times l}{A}$$

$$= \frac{0.0167 \times 30}{2.5}$$

$$= 0.2004 \text{ Ohm}$$

13. Tegangan yang diperlukan

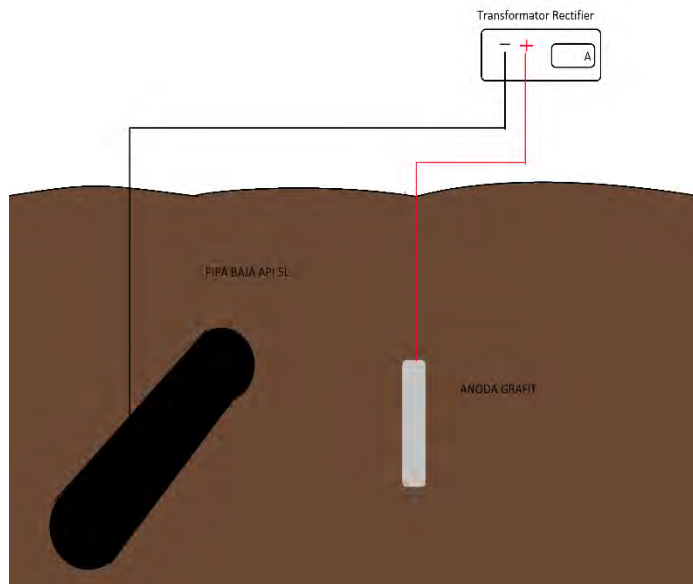
$$Vo = IR \times ((Rh + Rc + rp + \rho) + e) \times Sf$$

$$= 20.835392 \times ((10.78045462 + 0.2004 + 1.541512484 + 200) + 2) \times 1.25$$

$$= 1.504187005 \text{ v}$$

Perancangan sistem proteksi arus paksa pada pipa coating memerlukan arus proteksi sebesar 4.45 mA.

IV.2 Skema Desain Perancangan



Gambar 4.1 Hasil skema perancangan sistem proteksi katodik arus paksa.

Setelah mendapatkan perhitungan keperluan arus proteksi hingga anoda yang dibutuhkan, maka proses berikutnya adalah persiapan alat dan bahan. Pipa baja API 5L grade B dengan dimensi masing-masing berukuran panjang 15000 mm, diameter 736 mm, dan ketebalan 105 mm. Pipa kemudian dibersihkan sehingga tidak ada kotoran yang menempel pada permukaan pipa. Pipa selanjutnya dipasang baut dan mur sebagai tempat mengaitkan kabel dengan cara dilas. Setelah selesai pemasangan baut dan mur, pipa diberikan lapisan pelindung/coating yang berbeda-beda. Satu pipa dibiarkan tanpa lapisan pelindung/coating, satu pipa diberikan lapisan pelindung/coating dengan wrapping. Sementara untuk anoda diberikan backfill menggunakan serbuk grafit, kemudian dilapisi dengan lapisan logam. Pipa dan anoda grafit kemudian



dipasangi kabel, kemudian ditanam di dalam tanah pada kedalaman 50 cm. Sebelum dipasang menuju rectifier, pipa yang telah ditanam di dalam tanah diukur potensialnya menggunakan elektroda acuan Cu/CuSO_4 . Setelah mengetahui potensial pipa, kabel dari pipa dan anoda kemudian dihubungkan menuju rectifier, dimana kabel yang berasal dari pipa dihubungkan dengan kutub negatif dari transformator rectifier sementara kabel yang berasal dari anoda dihubungkan dengan kutub positif dari transformator rectifier. Setelah pemasangan kabel selesai rectifier dinyalakan dan tegangan dan arus yang keluar diatur agar pipa tersebut dapat terproteksi yaitu dirange sekitar -850mv sampai dengan -1100mv.

IV.3 Pengukuran Resistivitas Tanah

Pengukuran resistivitas tanah dilakukan untuk mengetahui seberapa besar resistansi tanah dalam menghantarkan aliran listrik, hasil pengujian resistivitas tanah dapat mengelompokkan tanah menjadi beberapa bagian sesuai dengan tingkat korosifitasnya. Pengujian resistivitas tanah dilakukan secara konvensional dengan menggunakan Standar ASTM G 57-78 atau lebih dikenal dengan *Wenner Four-Pins Method*. Prinsip metode ini adalah memberikan suplai arus AC pada pin-pin terluar dan secara simultan mengukur penurunan tegangan di antara pin-pin bagian dalam akibat timbulnya tahanan pada elektrolit. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan dengan kedalaman dan jarak yang berbeda beda untuk mendapatkan nilai tanah yang menyeluruh. Jarak dan kedalaman yang digunakan pada pengukuran ini adalah jarak (a_1) 10 cm, kedalaman (d_1) 200 cm, (a_2) 20 cm (d_2) 400 cm, (a_3) 30 cm (d_3) 30 cm, (a_4) 40 cm (d_4) 40 cm. Pengukuran resistivitas tanah dilakukan setiap hari selama 30 hari, kemudian nilai tahanan jenis dihitung sesuai rumus

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (4.1)$$

dengan :



ρ = Tahanan Jenis Tanah (Ohm-cm)

$\pi = 3.14$

a = Jarak antar pin (cm)

R = Hambatan yang terukur (ohm)

Hasil pengukuran berada di bagian lampiran, sehingga untuk rata-rata dari pengukuran adalah

$$\rho \text{ rata - rata} = \frac{\sum \rho}{N} \quad (4.2)$$

dimana:

$\sum \rho$ = Jumlah hasil pengukuran tahanan

N = Jumlah pengukuran yang dilakukan.

Tabel 4. 1. Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah

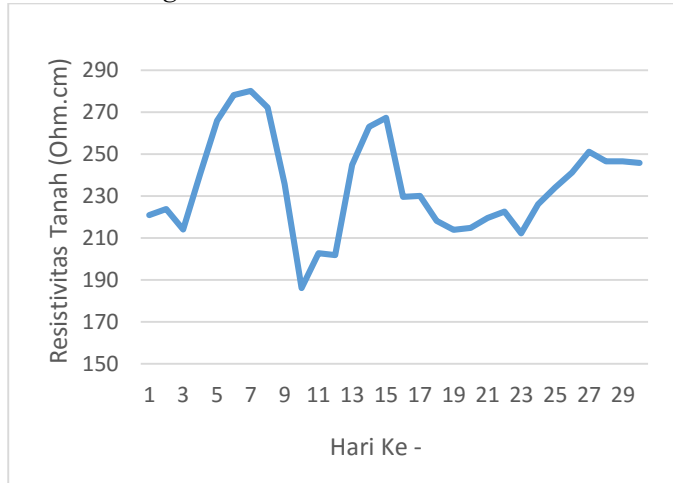
Hari Ke -	Nilai Resistivitas	Hari Ke -	Nilai Resistivitas
1	220.9044	16	229.5629
2	223.7655	17	230.1190
3	214.0238	18	218.2310
4	240.5295	19	213.9531
5	265.9677	20	214.8569
6	278.1027	21	219.5799
7	280.1656	22	222.6705
8	272.1304	23	212.1840
9	235.6622	24	226.0507
10	186.1379	25	234.0182
11	202.7377	26	241.1840
12	201.8630	27	251.1054
13	244.9578	28	246.4917
14	263.0287	29	246.6186
15	267.2770	30	245.8371
Rata - Rata			234.9906

Dengan mengukur resistivitas tanah setiap harinya, kemudian pada hari terakhir didapat seluruh perkembangan resistivitas tanah, didapat bahwa rata-rata resistivitas tanah sebesar



234.9906 Ohm.cm. dengan mengetahui tahanan jenis tanah, tanah tersebut dapat digolongkan menjadi golongan tanah korosif

Grafik 4.1. Hasil Pengukuran Resistivitas Tanah



Dari grafik 4.1 dan table 4.1 pengukuran resistivitas dapat dilihat bahwa resistivitas tanah tersebut fluktuatif hal ini diakibatkan kondisi lingkungan yang berubah-ubah dari hujan menjadi kering dan sebaliknya. Nilai resistivitas minimum yang diperoleh adalah 186.1379 Ohm.cm pada hari ke 10, hal tersebut didukung oleh kondisi lingkungan setelah hujan dan tanah tergenang oleh air, sehingga menyebabkan resistivitas menjadi semakin kecil. Dapat disimpulkan bahwa pada hari tersebut kondisi tanah menjadi sangat korosif dibandingkan hari lain. Sementara nilai resistivitas maksimum yang diperoleh adalah 280.1656 Ohm.cm pada hari ke 7, kondisi lingkungan yang kering pada hari ke 7 membuat nilai resistivitas tanah menjadi meningkat. Secara umum kondisi resistivitas tanah berada direntang antara 200 – 300 Ohm.cm. Dari pengukuran resistivitas tanah dapat diketahui perubahan kondisi lingkungan yang berubah-ubah dari hujan menjadi kering maupun sebaliknya mempengaruhi resistivitas tanah. Hal ini di sebabkan semakin lembab maka kadar air pada



lapisan tanah akan semakin tinggi dan tahanan jenis tanah akan semakin rendah (Linda, 2011). Dengan melihat nilai resistivitas tanah yang ada, perancangan proteksi katodik arus paksa ini setidaknya menjadi acuan apa yang terjadi jika dalam jangka waktu yang lama perubahan lingkungan berubah ubah dari musim hujan, pertengahan, sampai kering. Hal tersebut dapat dilihat dari perubahan dan naik turunnya nilai resistivitas tanah yang dikumpulkan. Kenaikan nilai resistivitas tanah dapat menunjukkan kondisi disaat musim kering, penurunan nilai resistivitas tanah menunjukkan kondisi disaat musim hujan, dan perubahan yang fluktuatif atau naik turun menunjukkan kondisi musim pertengahan.

IV.4 Pengukuran pH Tanah

Pengukuran pH tanah dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman tanah yang dapat mempengaruhi tingkat korosifitas. Pengujian pH tanah dilakukan sesuai dengan Standart Operational Procedure (SOP) Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standard Operation Procedure pH Soil Determination. Sample tanah kering diambil sebesar 10 gram, kemudian diberi air sebanyak 10 mL. Sample tersebut kemudian diaduk agar tercampur dan dibiarkan sekitar 1 jam. Setelah 1 jam, sample tanah tersebut diukur dengan pH meter yang sebelumnya telah dikalibrasi dengan larutan buffer (pH 7).



Gambar 4.2 Sample tanah ± 10 gram



Gambar 4.3 Sample tanah dicampur dengan air sebanyak ± 10 mL



Gambar 4.4 Pengukuran pH pada sample tanah

Pengujian pH tanah dilakukan setiap hari selama 30 hari agar dapat mengetahui perkembangan kondisi pH tanah. Dari hasil pengujian pH tanah yang terlihat dari grafik dapat dilihat bahwa kondisi pH tanah cenderung stabil dibesaran sekitar.

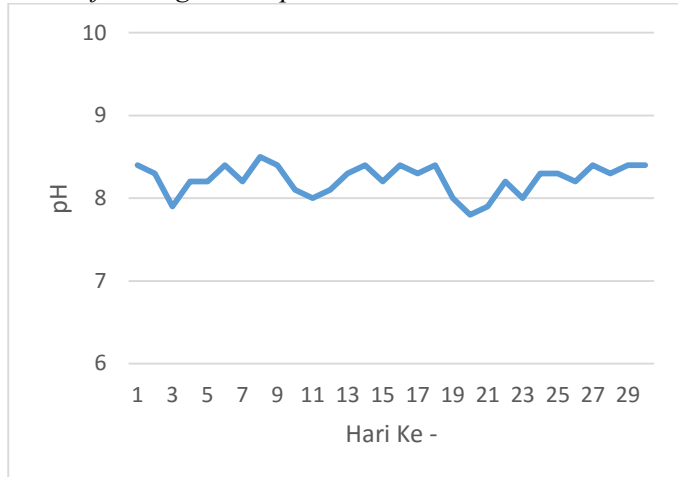
Tabel 4.2. Hasil Pengukuran pH

Hari Ke -	pH	Hari Ke -	pH
1	8.4	16	8.4
2	8.3	17	8.3
3	7.9	18	8.4
4	8.2	19	8.0
5	8.2	20	7.8
6	8.4	21	7.9
7	8.2	22	8.2
8	8.5	23	8.0
9	8.4	24	8.3
10	8.1	25	8.3
11	8.0	26	8.2
12	8.1	27	8.4
13	8.3	28	8.3



14	8.4	29	8.4
15	8.2	30	8.4

Grafik 4.2. Grafik Pengukuran pH Tanah



Dari tabel 4.2 dan grafik 4.2 dapat dilihat bahwa kondisi pH pada lingkungan tersebut fluktuatif diantara pH 7.8 hingga 8.4. Hal tersebut dikarenakan kondisi tanah cenderung berubah ubah sesuai lingkungannya, namun kondisi tanah yang berada di pH 7.8 hingga 8.4 mengindikasikan bahwa kondisi tanah tidak memiliki kandungan asam atau basa yang berlebih. Sehingga pengaruh pH dalam perancangan ini tidak dapat menjadi suatu acuan apakah pH tanah yang ada mempengaruhi perancangan dan kebutuhan arus yang diperlukan dalam perancangan proteksi arus paksa.

IV.5 Pengujian Arus dan Tegangan Proteksi

Pengujian arus dan tegangan proteksi dilakukan untuk mengetahui apakah tegangan dan arus sistem proteksi yang dikeluarkan oleh rectifier sudah memproteksi pipa kedalam area proteksi yaitu sekitar -850mV sampai dengan -1100mV dengan menggunakan electrode CuCuSO_4 sebagai reference. Pengujian dilakukan dengan membuat test point yang berasal dari rangkaian paralel sistem proteksi, test point berasal dari kabel yang terhubung



dengan pipa kemudian dihubungkan dengan multimeter yang telah disambung dengan elektroda reference CuCuSO_4 dan ditancap kedalam tanah sehingga tegangan dapat diukur dan terbaca di multimeter. Sebelum proteksi arus paksa dilakukan pipa yang telah ditanam di dalam tanah dilakukan pengukuran potensial pipa untuk mengetahui seberapa besar potensial pipa yang telah ditanam dan sebelum diberi proteksi arus paksa

Tabel 4.3. Hasil Pengukuran Potensial Pipa Sebelum Proteksi

Jenis Pipa	Potensial Pipa (mV)
Pipa Tanpa Coating	-620
Pipa Coating	-640



Gambar 4.5 Pengukuran potensial awal pipa sebelum diberi arus proteksi

Untuk mengetahui tegangan yang keluar dari rectifier dapat dibaca langsung pada display rectifier dengan satuan Volt (V), sementara untuk membaca arus yang keluar kabel yang berasal dari kutub positif rectifier dihubungkan dengan multimeter secara seri sehingga arus yang keluar dari rectifier dapat terbaca hingga



satuan miliamper (mA). Pengujian tersebut dilakukan dan dikontrol setiap hari selama 30 hari. Dimana dalam setiap hari perkembangan proteksi dilakukan dengan mengontrol tegangan dan arus yang diperlukan untuk memproteksi pipa sehingga tidak terjadi over proteksi atau kurang proteksi.

Tabel 4.4. Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Tanpa Coating

Hari Ke -	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke -	Arus Proteksi (mA)
1	17.6	16	17.4
2	17.6	17	17.0
3	15.6	18	17.3
4	17.7	19	21.1
5	15.7	20	18.3
6	16.3	21	18.3
7	15.6	22	19.9
8	17.1	23	21.8
9	17.9	24	19.1
10	22.1	25	18.8
11	20.3	26	18.9
12	21.2	27	18.8
13	22.1	28	18.5
14	19.2	29	18.4
15	16.9	30	18.4
Rata - Rata			18.3867

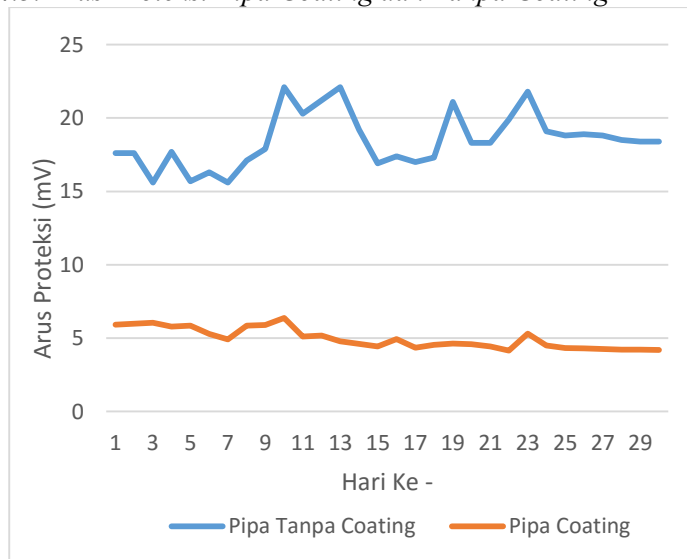
Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Arus Proteksi Pipa Coating

Hari Ke -	Arus Proteksi (mA)	Hari Ke -	Arus Proteksi (mA)
1	5.91	16	4.94
2	5.98	17	4.36
3	6.05	18	4.54
4	5.79	19	4.64
5	5.85	20	4.60



6	5.29	21	4.44
7	4.91	22	4.16
8	5.86	23	5.32
9	5.89	24	4.51
10	6.38	25	4.32
11	5.12	26	4.31
12	5.18	27	4.27
13	4.78	28	4.21
14	4.62	29	4.21
15	4.44	30	4.20
Rata – Rata			4.9893

Grafik 4.3. Arus Proteksi Pipa Coating dan Tanpa Coating



Dari grafik 4.3 pengujian diatas dapat diketahui bahwa pengaruh coating sangat mempengaruhi arus yang diperlukan untuk memproteksi pipa. Pada pipa yang dicoating memerlukan arus yang lebih kecil dibandingkan dengan pipa yang tidak dicoating. Pipa yang dicoating cenderung stabil dan tidak mengalami kenaikan ataupun penurunan arus yang drastis untuk



dapat memproteksi pipa tersebut, sementara pada pipa yang tidak di coating memiliki grafik yang naik turun. Pipa yang tidak di coating terus mengalami kenaikan hal ini dikarenakan pada pipa yang tidak di coating, perlindungan utama dari korosi hanya berasal dari proteksi arus paksa, jika dibandingkan dengan pipa yang dicoating perlindungan terhadap korosi didapat dari lapisan pelindung pipa dan proteksi arus paksa sehingga pada pipa yang tidak dicoating memerlukan arus proteksi yang lebih besar.

Tabel 4.6. Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa tanpa Coating

Hari Ke -	Potesial Proteksi (mV)	Hari Ke -	Potensial Proteksi (mV)
1	-878	16	-977
2	-994	17	-868
3	-820	18	-876
4	-894	19	-987
5	-848	20	-879
6	-875	21	-871
7	-872	22	-973
8	-924	23	-964
9	-833	24	-961
10	-941	25	-957
11	-877	26	-960
12	-959	27	-958
13	-1025	28	-956
14	-939	29	-953
15	-844	30	-952

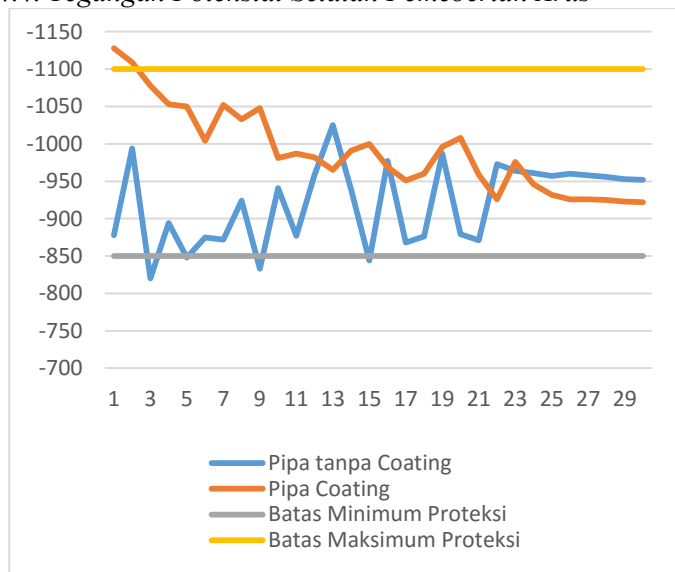
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Potensial Proteksi Pipa Coating

Hari Ke -	Potesial Proteksi (mV)	Hari Ke -	Potensial Proteksi (mV)
1	-1128	16	-969
2	-1109	17	-951



3	-1078	18	-960
4	-1053	19	-996
5	-1050	20	-1008
6	-1004	21	-959
7	-1001	22	-926
8	-1033	23	-976
9	-1048	24	-946
10	-981	25	-932
11	-987	26	-926
12	-982	27	-926
13	-965	28	-925
14	-991	29	-923
15	-1000	30	-922

Grafik 4.4. Tegangan Potensial Setelah Pemeberian Arus



Dari grafik 4.4 dan table 4.6 dan 4.7 diatas dapat dilihat pada pipa yang dicoating pemasangan awal akan mengakibatkan potensial pipa melebihi range proteksi yang diharuskan yaitu -850



mV hingga -1100 mV, hal tersebut dikarenakan potensial pipa coating diawal memang lebih tinggi dibandingkan dengan pipa tanpa coating, kemudian setelah pipa tersebut diberi arus proteksi, arus yang diberikan lebih tinggi dibandingkan dengan keperluan arus proteksi seharusnya. Namun seiring berjalan waktu dan pengontrolan arus yang dilakukan pipa coating dapat terus terjaga pada range proteksi. Sementara itu pada pipa yang tidak dicoating cenderung fluktuatif dan sempat beberapa kali tidak berada di zona proteksi. Hal ini dikarenakan pada lingkungan yang terus berubah keperluan arus akan ikut berubah, sehingga perubahan arus proteksi yang dilakukan mengakibatkan potensial proteksi dari pipa tanpa coating juga terus berubah. Jika dibandingkan dengan pipa coating yang mendapat proteksi yang berasal dari lapisan coating dan arus paksa sementara pipa tanpa coating hanya berasal dari arus paksa hal tersebut akan sangat mempengaruhi potensial proteksi dari pipa. Dapat disimpulkan pipa coating lebih mudah dikontrol untuk terus berada di zona proteksi, sementara pada pipa tanpa coating pengontrolan arus harus lebih diperhatikan,

Dengan melihat data dari resistivitas tanah dengan arus proteksi yang diperlukan, pada kondisi resistivitas tanah minimum yaitu 186.1379 Ohm.cm pada hari ke 10, pada pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 22.1 mA sementara pada pipa coating sebesar 6.38 mA. Pada hari ke 12 resistivitas menunjukkan nilai 201.8630 Ohm.cm, pada pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 21.2 mA sementara pada pipa coating sebesar 5.18 mA. Selain resistivitas minimum yang ditunjukkan pada hari ke 10 dan 12, pada hari ke 23 resistivitas juga menunjukkan nilai resistivitas yang rendah yaitu 212.1840 Ohm.cm, pada kondisi tersebut pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 21.8 mA sementara pada pipa coating sebesar 5.32 mA. Pada kondisi resistivitas tanah maksimum yaitu 280.1656 Ohm.cm pada hari ke 7, pada pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 15.6 mA sementara pada pipa coating sebesar 4.91 mA. Selain resistivitas maksimum yang ditunjukkan pada hari ke 7, pada hari ke 6 resistivitas juga menunjukkan nilai resistivitas yang tinggi



yaitu 278.1027 Ohm.cm, pada kondisi tersebut pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 16.3 mA sementara pada pipa coating sebesar 5.29 mA. Selain itu pada hari ke 15 resistivitas juga menunjukkan nilai resistivitas yang tinggi yaitu 267.2770 Ohm.cm, pada kondisi tersebut pipa tanpa coating memerlukan arus proteksi sebesar 16.9 mA sementara pada pipa coating sebesar 4.44 mA. Hal tersebut semakin membuktikan bahwa saat resistivitas meningkat atau kondisi lingkungan menjadi kering keperluan arus proteksi menjadi menurun, sementara pada saat resistivitas menurun atau kondisi lingkungan menjadi lembab keperluan arus proteksi akan meningkat.

IV.6 Evaluasi Visual

Setelah 30 hari, pipa yang telah ditanam dan diberi proteksi arus paksa diangkat untuk mengetahui kondisi pipa.



Gambar 4.6 Pipa tanpa coating setelah 30 hari pemberian arus proteksi



(a)



(b)



(c)



*Gambar 4.7 Pipa coating setelah 30 hari pemberian arus proteksi
(a) bagian awal pipa, (b) bagian tengah pipa, (c) bagian akhir
pipa*

Setelah 30 hari proteksi dapat dilihat kondisi yang berbeda diantara kedua pipa tersebut. Pada pipa yang diberi coating kondisi coating pipa masih terlihat baik, tidak mengalami kerusakan walaupun pada prosesnya sempat mengalami over proteksi, namun kondisi pipa tersebut masih baik. Sementara pada pipa yang tidak diberi coating terlihat pada beberapa titik terdapat hasil korosi yaitu karat, namun jumlah tersebut tergolong kecil dibanding permukaan luas dari pipa.



*Gambar 4.8 Pipa tanpa coating mengalami korosi dibagian
sambungan baut kabel*



Gambar 4.9 Pipa tanpa coating terdapat karat pada beberapa titik

Terlihat pada gambar 4.8 dan 4.9 diatas beberapa lokasi pada pipa mengalami korosi, namun yang paling jelas terlihat adalah pada sambungan pipa dengan baut sebagai pengait kabel. Hal tersebut dapat terjadi akibat adanya perbedaan jenis logam antara pipa dan baut, serta adanya pengaruh pengelasan. Sehingga pada pipa tersebut terjadi korosi galvanis, pada pipa yang tidak dicoating dapat terlihat bahwa proteksi arus paksa tidak terlalu efektif untuk memproteksi pipa diakibatkan pengaruh lingkungan yang terus berubah-ubah menjadikan proteksi arus paksa juga terus berubah ubah. Sehingga tidak dapat memproteksi pipa dengan efektif yang mengakibatkan korosi masih terjadi.



Gambar 4.10 Pengukuran dimensi pipa tanpa coating



Pengukuran diameter pipa juga dilakukan, untuk mengetahui seberapa besar korosi mengurangi dimensi dari pipa, setelah diukur maka didapat hasil yang sama seperti sebelum pipa ditanam, dapat disimpulkan bahwa pipa setelah 30 hari tidak mengalami perubahan dimensi, hanya pada pipa yang tidak dicoating mengalami korosi yang berada di permukaan pipa.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.11 Hasil pipa coating yang telah dibuka lapisan coatingnya (a) Keseluruhan Pipa, (b) Bagian awal pipa, (c) Bagian tengah pipa, (d) Bagian akhir pipa

Lapisan coating pada pipa yang diberi lapisan coating dibuka agar mengetahui kondisi dari pipa tersebut. Setelah dibuka dapat dilihat pada gambar pipa tersebut tidak terdapat tanda tanda adanya terjadi proses korosi. Hal ini diakibatkan oleh perlindungan yang diberikan oleh lapisan coating serta pemberian arus proteksi. Sehingga perlindungan tersebut sangat efektif untuk mencegah terjadinya proses korosi.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.12 Pipa tanpa pemberian arus proteksi dan lapisan coating selama 30 hari

Pada gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada pipa tanpa pemberian arus proteksi dan lapisan coating mengalami korosi yang sangat hebat sehingga hampir keseluruhan permukaan pipa mengalami korosi. Sementara pada pipa tanpa coating korosi yang terjadi sangat minim hanya berada pada bagian sambungan pipa, hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan potensial logam dari pipa dan sambungan baut akibat dari perbedaan potensial pada pipa mengalami korosi galvanik. Pada pipa dengan pemberian arus proteksi dan lapisan coating hasil yang didapat tidak ada hasil korosi yang terdapat pada permukaan pipa, pemberian arus proteksi dan lapisan coating sangat efektif untuk mengurangi laju korosi. dari hasil tersebut perancangan proteksi dapat digunakan dan telah berjalan dengan baik.s

Setelah 30 hari, anoda yang ditanam juga diambil untuk mengetahui perubahan perubahan apa yang terjadi pada anoda grafit.



Gambar 4.13 Anoda grafit pada pipa tanpa coating



Gambar 4.14 Anoda grafit pada pipa coating

Pada gambar dapat terlihat bahwa anoda yang digunakan pada pipa tanpa coating mengalami perubahan warna, anoda grafit tersebut terdapat bercak warna kecoklatan di permukaannya, hal ini terjadi karena pada pipa tanpa coating memerlukan proteksi arus paksa yang lebih besar dibandingkan dengan pipa coating, dimana



kebutuhan elektron untuk proteksi pipa berasal dari anoda grafit, hal tersebut menyebabkan anoda grafit menjadi berubah warna. Sementara pada anoda grafit yang digunakan pada pipa coating tidak mengalami perubahan hal tersebut diakibatkan pipa coating memiliki proteksi tambahan yang berasal dari coating atau lapisan pelindung sehingga anoda grafit yang digunakan tidak terlalu signifikan digunakan. Dalam proteksi arus paksa penggunaan coating tidak hanya mengurangi keperluan arus proteksi namun dapat membantu proteksi pipa secara signifikan, sehingga pipa yang di tanam di dalam tanah sebaiknya diberikan coating terlebih dahulu, hal tersebut akan membuat permukaan pipa tidak mengalami kontak langsung dengan lingkungan dalam hal ini tanah. Sehingga proses korosi dapat dicegah dengan baik. Namun jika tetap menggunakan pipa tanpa coating di dalam tanah akan lebih baik jika menggunakan rectifier yang memiliki pengaturan arus, sehingga arus yang keluar dari rectifier akan stagnan dalam posisi tertentu sehingga proteksi dapat berjalan secara terus menerus. Tetapi yang perlu diperhatikan dalam pada penggunaan rectifier dengan pengaturan arus adalah perubahan lingkungan yang secara terus menerus berubah. Sehingga pengaturan arus yang diperlukan akan sangat diperlukan secara intens dan berkala.

Laporan Harian Pengukuran Arus dan Potensial Proteksi							
Hari Ke-	Pipa Coating			Pipa Tanpa Coating			Kondisi Permukaan Tanah
	$V_{\text{rectifier}}$ (Volt)	$I_{\text{rectifier}}$ (mA)	V_{proteksi} (mV)	$V_{\text{rectifier}}$ (Volt)	$I_{\text{rectifier}}$ (mA)	V_{proteksi} (mV)	
1	0.70	5.91	-1128	0.97	17.6	-878	Kering
2	0.70	5.98	-1109	1.61	17.6	-994	Kering
3	0.70	6.05	-1078	1.61	15.6	-820	Basah
4	0.70	5.79	-1053	2.44	17.7	-894	Kering
5	0.70	5.85	-1050	2.44	15.7	-848	Kering
6	0.70	5.29	-1004	2.74	16.3	-875	Kering
7	0.70	4.91	-1001	2.74	15.6	-872	Kering
8	0.89	5.86	-1033	3.28	17.1	-924	Kering
9	0.75	5.89	-1048	3.28	17.9	-833	Basah
10	0.91	6.38	-981	4.13	22.1	-941	Lembab
11	0.75	5.12	-987	4.09	20.3	-877	Lembab
12	0.75	5.18	-982	4.09	21.2	-959	Kering
13	0.75	4.78	-965	4.09	22.1	-1025	Kering
14	0.75	4.62	-991	3.75	19.2	-939	Kering
15	0.71	4.44	-1000	3.75	16.9	-844	Kering
16	0.75	4.94	-969	4.20	17.4	-977	Kering

17	0.75	4.36	-951	4.20	17.0	-868	Kering
18	0.75	4.54	-960	4.20	17.3	-876	Lembab
19	0.75	4.64	-996	5.15	21.1	-987	Lembab
20	0.75	4.60	-1008	5.15	18.3	-879	Lembab
21	0.73	4.44	-959	5.15	18.3	-871	Lembab
22	0.70	4.16	-926	5.15	19.9	-973	Kering
23	0.75	5.32	-976	5.15	21.8	-964	Lembab
24	0.75	4.51	-946	5.15	19.1	-961	Kering
25	0.75	4.32	-932	5.01	18.8	-957	Kering
26	0.75	4.31	-926	5.01	18.9	-960	Kering
27	0.75	4.27	-926	5.00	18.8	-958	Kering
28	0.75	4.21	-925	5.00	18.5	-956	Kering
29	0.75	4.21	-923	5.00	18.4	-953	Kering
30	0.75	4.20	-922	5.00	18.4	-952	Kering

Laporan Harian Pengukuran Resistivitas Tanah								
Hari Ke	Pengukuran ke-	Kedalaman (cm)	Jarak Elektroda (cm)	V (Volt)	I (ampere)	R	ρ	Rata-Rata
1	1	10	200	0.028	0.21	0.133333	167.4667	220.9044
	2	20	400	0.032	0.32	0.1	251.2	
	3	30	30	0.75	0.91	0.824176	155.2747	
	4	40	40	0.752	0.61	1.232787	309.6761	
2	1	10	200	0.051	0.29	0.175862	220.8828	223.7655
	2	20	400	0.039	0.39	0.1	251.2	
	3	30	30	1.064	1.09	0.976147	183.9061	
	4	40	40	0.828	0.87	0.951724	239.0731	
3	1	10	200	0.073	0.45	0.162222	203.7511	214.0238
	2	20	400	0.037	0.32	0.115625	290.45	
	3	30	30	0.829	0.99	0.837374	157.7612	
	4	40	40	0.772	0.95	0.812632	204.1331	
4	1	10	200	0.073	0.31	0.235484	295.7677	240.5295
	2	20	400	0.039	0.34	0.114706	288.1412	
	3	30	30	0.964	1.04	0.926923	174.6323	

	4	40	40	0.778	0.96	0.810417	203.5767	
5	1	10	200	0.073	0.34	0.214706	269.6706	265.9677
	2	20	400	0.035	0.27	0.12963	325.6296	
	3	30	30	1.113	1.01	1.10198	207.6131	
	4	40	40	1.257	1.21	1.038843	260.9574	
6	1	10	200	0.037	0.17	0.217647	273.3647	278.1027
	2	20	400	0.043	0.29	0.148276	372.469	
	3	30	30	1.051	1.06	0.991509	186.8004	
	4	40	40	1.214	1.09	1.113761	279.7769	
7	1	10	200	0.038	0.16	0.2375	298.3	280.1656
	2	20	400	0.023	0.21	0.109524	275.1238	
	3	30	30	1.012	0.77	1.314286	247.6114	
	4	40	40	1.157	0.97	1.192784	299.6272	
8	1	10	200	0.057	0.29	0.196552	246.869	272.1304
	2	20	400	0.042	0.41	0.102439	257.3268	
	3	30	30	0.57	0.37	1.540541	290.2378	
	4	40	40	0.48	0.41	1.170732	294.0878	
10	1	10	200	0.0675	0.27	0.25	314	235.6622

	2	20	400	0.039	0.37	0.105405	264.7784	
	3	30	30	0.58	0.68	0.852941	160.6941	
	4	40	40	0.55	0.68	0.808824	203.1765	
11	1	10	200	0.075	0.42	0.178571	224.2857	186.1379
	2	20	400	0.022	0.49	0.044898	112.7837	
	3	30	30	0.816	0.8	1.02	192.168	
	4	40	40	0.66	0.77	0.857143	215.3143	
12	1	10	200	0.05	0.44	0.113636	142.7273	202.7377
	2	20	400	0.032	0.46	0.069565	174.7478	
	3	30	30	0.87	0.57	1.526316	287.5579	
	4	40	40	0.623	0.76	0.819737	205.9179	
13	1	10	200	0.065	0.46	0.141304	177.4783	201.863
	2	20	400	0.037	0.41	0.090244	226.6927	
	3	30	30	0.832	0.75	1.109333	208.9984	
	4	40	40	0.611	0.79	0.773418	194.2825	
14	1	10	200	0.061	0.37	0.164865	207.0703	244.9578
	2	20	400	0.035	0.31	0.112903	283.6129	
	3	30	30	0.845	0.69	1.224638	230.7217	

	4	40	40	0.751	0.73	1.028767	258.4263	
15	1	10	200	0.059	0.3	0.196667	247.0133	263.0287
	2	20	400	0.031	0.25	0.124	311.488	
	3	30	30	0.851	0.65	1.309231	246.6591	
	4	40	40	0.698	0.71	0.983099	246.9544	
16	1	10	200	0.062	0.33	0.187879	235.9758	267.277
	2	20	400	0.035	0.27	0.12963	325.6296	
	3	30	30	0.860	0.86	1	188.4	
	4	40	40	0.813	0.64	1.270313	319.1025	
17	1	10	200	0.066	0.41	0.160976	202.1854	229.5629
	2	20	400	0.029	0.33	0.087879	220.7515	
	3	30	30	0.91	0.61	1.491803	281.0557	
	4	40	40	0.58	0.68	0.852941	214.2588	
18	1	10	200	0.067	0.37	0.181081	227.4378	230.119
	2	20	400	0.031	0.33	0.093939	235.9758	
	3	30	30	0.813	0.66	1.231818	232.0745	
	4	40	40	0.618	0.69	0.895652	224.9878	
19	1	10	200	0.069	0.43	0.160465	201.5442	218.231

	2	20	400	0.037	0.41	0.090244	226.6927	
	3	30	30	0.835	0.68	1.227941	231.3441	
	4	40	40	0.603	0.71	0.849296	213.3431	
20	1	10	200	0.065	0.39	0.166667	209.3333	213.9531
	2	20	400	0.035	0.33	0.106061	266.4242	
	3	30	30	0.678	0.69	0.982609	185.1235	
	4	40	40	0.582	0.75	0.776	194.9312	
21	1	10	200	0.071	0.41	0.173171	217.5024	214.8569
	2	20	400	0.029	0.31	0.093548	234.9935	
	3	30	30	0.714	0.65	1.098462	206.9502	
	4	40	40	0.613	0.77	0.796104	199.9813	
22	1	10	200	0.081	0.47	0.17234	216.4596	219.5799
	2	20	400	0.035	0.35	0.1	251.2	
	3	30	30	0.651	0.58	1.122414	211.4628	
	4	40	40	0.452	0.57	0.792982	199.1972	
23	1	10	200	0.074	0.41	0.180488	226.6927	222.6705
	2	20	400	0.036	0.37	0.097297	244.4108	
	3	30	30	0.698	0.63	1.107937	208.7352	

	4	40	40	0.512	0.61	0.839344	210.8433	
24	1	10	200	0.077	0.43	0.17907	224.9116	212.184
	2	20	400	0.031	0.31	0.1	251.2	
	3	30	30	0.673	0.59	1.140678	214.9037	
	4	40	40	0.383	0.61	0.627869	157.7207	
25	1	10	200	0.071	0.37	0.191892	241.0162	226.0507
	2	20	400	0.035	0.34	0.102941	258.5882	
	3	30	30	0.771	0.61	1.263934	238.1252	
	4	40	40	0.391	0.59	0.662712	166.4732	
26	1	10	200	0.081	0.41	0.197561	248.1366	234.0182
	2	20	400	0.041	0.42	0.097619	245.219	
	3	30	30	0.721	0.57	1.264912	238.3095	
	4	40	40	0.415	0.51	0.813725	204.4078	
27	1	10	200	0.076	0.39	0.194872	244.759	241.184
	2	20	400	0.052	0.45	0.115556	290.2756	
	3	30	30	0.756	0.62	1.219355	229.7265	
	4	40	40	0.406	0.51	0.796078	199.9749	
28	1	10	200	0.071	0.31	0.229032	287.6645	251.1054

	2	20	400	0.049	0.43	0.113953	286.2512	
	3	30	30	0.689	0.61	1.129508	212.7993	
	4	40	40	0.416	0.48	0.866667	217.7067	
29	1	10	200	0.079	0.39	0.202564	254.4205	246.4917
	2	20	400	0.052	0.45	0.115556	290.2756	
	3	30	30	0.711	0.58	1.225862	230.9524	
	4	40	40	0.427	0.51	0.837255	210.3184	
30	1	10	200	0.069	0.35	0.197143	247.6114	246.6186
	2	20	400	0.047	0.41	0.114634	287.961	
	3	30	30	0.688	0.61	1.127869	212.4905	
	4	40	40	0.522	0.55	0.949091	238.4116	

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari perancangan sistem proteksi arus paksa pada pipa baja API 5L Grade B dengan coating dan tanpa coating di dalam tanah ini adalah

1. Keperluan arus proteksi pada pipa yang tidak dicoating lebih besar dibandingkan dengan pipa yang dicoating, dimana rata rata keperluan arus proteksi pada pipa yang tidak dicoating sebesar 18.38 mA, sementara pada pipa yang dicoating sebesar 4.98 mA.
2. Perubahan lingkungan mempengaruhi keperluan arus proteksi yang digunakan, saat lingkungan menjadi basah atau lembab nilai resistivitas tanah menurun, menyebabkan keperluan arus untuk proteksi menjadi meningkat. Sementara pada kondisi lingkungan kering, nilai resistivitas tanah meningkat, menyebabkan keperluan arus proteksi menjadi menurun.
3. Perancangan sistem proteksi arus paksa yang telah digunakan dapat dijalankan dengan baik.

V.2 Saran

Saran yang penulis berikan setelah proses perancangan proteksi katodik adalah

1. Penggunaan sambungan pipa untuk mengaitkan kabel sebaiknya tidak menggunakan las lasan.
2. Variabel tambahan pada pipa dapat digunakan pada penelitian berikutnya, seperti pengaruh las lasan, cacat, atau ukuran pipa yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardianysah, F. P. (2015). *Pengaruh Kondisi Tanah Asam dan Cacat Gores Berbentuk Persegi Panjang pada Lapis Lindung Terhadap Kebutuhan Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) dengan Menggunakan Baja AISI 1045*. Surabaya: ITS.
- ASTM. (2001). *United States of America Patent No. G57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four - Electrode Method*.
- Labolatory, B. o. (2013). *Corrosion and Cathodic Protection*. Denver: Bureau of Reclamation Materials Engineering Research Labolatory, Denver Federal Center.
- NACE. (1997). *Houston, TX Patent No. RP-0268-97 Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines*.
- NACE. (2012). *Houston, TX Patent No. TM0497-2012 Test Method Measurement Techniques Related to Criteria for Cathodic Protection on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*.
- NACE. (2013). *Houston, TX Patent No. SP0169-2013 Control of External Corrosion of Underground or Submerged Metallic Piping System*.
- Pasaribu, L. (2011). *Studi Analisis Pengaruh Jenis Tanah, Kelembaban, Temperatur, dan Kadar Garam Terhadap Tahanan Pertanahan Tanah*. Depok: Universitas Indonesia.
- Peabody, A. (2001). *Control of Pipeline Corrosion, Second Edition*. Texas: NACE International.
- Perry, J. H. (1950). *Chemical Engineering Handbook, 6th Edition*. New York: Mc Graw Hill Book Company Company Inc.
- Santoso, A. (2015). *Pengaruh Variasi Resistivitas Tanah dan Kadar Air Tanah Terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan Variasi Goresan Lapis Lindung*. Surabaya: ITS.

- Saputra, T. L. (2015). *Pengaruh Variasi Cacat Goresan Lapis Lindung dan Variasi pH Tanah terhadap Arus Proteksi Sistem Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) pada Pipa Baja API 5L Grade B*. Surabaya: ITS.
- Saputra, T. Y. (2002). *Perancangan Sistem Proteksi Katodik Metode Arus Paksa pada Pipa PDAM Kota Surabaya Jalur Distribusi Jembatan Merah - Kedung Cowek*. Surabaya: Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI - ITS.
- SERAS. (2002). *USA Patent No. SOP 1844 Standart Operating Procedures Soil pH Determination*.
- Supomo. (1995). *Diktat Kuliah Korosi*. Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan.
- Trethewey, K. d. (1991). *Korosi untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*.

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Azmi Mahiri lahir di kota Bontang, tanggal 12 Januari 1994 merupakan putra keempat dari empat bersaudara Bapak Usman Gumanti dan Ibu Thurini Pariyantiko. Penulis menempuh pendidikan formalnya di SD YPVPD Bontang, SMP YPVPD Bontang, SMAN 4 Depok. Pada tahun 2012, setelah lulus dari SMA, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Penulis

sempat mengikuti berbagai aktivitas organisasi kemahasiswaan, diantara mejadi Staff di Departemen Dalam Negeri Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT) FTI ITS, pada tahun ketiga penulis menjadi Anggota Senat Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dan Bendahara II di Himpunan Mahasiswa Bontang cabang Surabaya. Dan pada tahun ketiga penulis menjadi Ketua Himpunan Mahasiswa Bontang cabang Surabaya. Penulis mengakhiri studi S1-nya dengan mengerjakan Tugas Akhir: Perancangan Sistem Proteksi Arus Paksa pada Pipa Baja API 5L Grade B dengan Coating dan Tanpa Coating di Dalam Tanah. Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail dan nomor telepon: mr.mahiriazmi@gmail.com dan +6281232418997.